

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES
Departamento De Economía Aplicada III (Política Económica)



TESIS DOCTORAL

**Desarrollo sostenible, aprendizaje desde el capital natural y
discontinuidad tecnológica**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR:

Álvaro Pío Gómez Olaya

DIRECTOR

PROF. DR. DN. ANDRÉS FERNÁNDEZ DÍAZ

Madrid 2015

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales
Departamento De Economía Aplicada III (Política Económica)



**DESARROLLO SOSTENIBLE, APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL
NATURAL Y DISCONTINUIDAD TECNOLÓGICA**

TESIS DOCTORAL

Álvaro Pío Gómez Olaya

DIRECTOR
PROF. DR. DN. ANDRÉS FERNÁNDEZ DÍAZ

Madrid 2015

Agradecimientos

El proceso de elaboración de este trabajo de investigación se ha beneficiado de la colaboración permanente de un conjunto de personas e instituciones que -de manera generosa- me ofrecieron estímulo intelectual y respaldo incondicional: todos ellos merecen reconocimiento.

Mi director de tesis, el doctor D. Andrés Fernández Díaz, me brindó la oportunidad de beneficiarme de los avances de su programa de investigación en “Economía de la Complejidad”, el cual ha generado un conjunto de libros, artículos y trabajos de tesis doctoral que son una muestra de la calidad de su proyecto. La participación en su curso “La Economía del No - Equilibrio y La No Linealidad” fue una excelente oportunidad para poder disfrutar de las lecciones de un investigador de auténtico talento. Adicionalmente, debo agradecerle su disposición a colaborar de la mejor manera posible cada una de las veces en las que fue necesaria su intervención para la solución de muchos de los retos que se presentaron a lo largo del desarrollo de éste proyecto.

El doctor D. Luis Alberto Alonso González ha sido un eficaz tutor de mi trabajo, desempeñándose -con frecuencia- como exigente contraparte intelectual. Someterse a su rigurosa evaluación es una dura, pero provechosa prueba. Su curso “Nuevas Aportaciones De Política Económica” me permitió estar en contacto con un investigador realmente creativo, lo cual fue inspirador. Su generosidad y apoyo decididos fueron imprescindibles para la superación de las graves dificultades que siguieron a la muerte de mi madre, y que me acompañaron durante buena parte del desarrollo de mi trabajo. Debo agradecerle, ante todo, por haberme honrado con su amistad.

La Universidad Complutense de Madrid, el Departamento de Economía Aplicada III y el Doctorado de Política Económica han sido espacios propicios para el crecimiento profesional y el desarrollo de las tareas de investigación. Agradezco la colaboración ofrecida por los profesores, el personal administrativo y de bibliotecas y los compañeros del doctorado; en especial deseo resaltar la colaboración ofrecida por los doctores José Andrés Fernández Cornejo y Lorenzo Escot Mangas.

Agradezco al Instituto Colombiano Para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología – COLCIENCIAS- por haber facilitado el apoyo financiero para el desarrollo de este proyecto, a través de su programa de Becas de Doctorado “Francisco José de Caldas”.

Los doctores Olman Segura Bonilla y Edgar Fürst Weingand acogieron mi trabajo con respeto e interés y mostraron gran disposición para discutir aspectos centrales de mi propuesta, relacionados con la Economía Ecológica y la Economía Evolutiva, durante mi estancia en el Centro Internacional de Política Económica de la Universidad Nacional de Costa Rica. Agradezco igualmente a mi asistente de investigación, Carolina Rojas, por el soporte brindado.

Debo, igualmente, gratitud y reconocimiento a mi familia por su confianza e incansable apoyo a lo largo de estos años, y a mis amigos del alma, Gerardo Rodríguez, Lorensa Ambrosio, Luis Alfonso Escobar, Pilar Castillo, Claudia Garzón, Daladier Ortíz, Christian Spillmann, Alois Hug, Nohra Soto, Luis Fernando Rodríguez, quienes dieron soporte espiritual a mi labor, con su generosidad. Todos ellos han sido cómplices de éste proyecto y han hecho que valga la pena seguir adelante: han soportado todo tipo de abusos de mi parte y confiaron en mí más allá de los límites razonables.

Para finalizar, simplemente debo agregar que, cualquier agradecimiento o reconocimiento serían insuficientes para corresponder a mi esposa, Adriana Castaño, por haber dado sentido a la culminación de este proyecto, el cual cuenta ahora con el impulso inspirador que le ha traído mi hijo Jerónimo.

“La naturaleza ha demostrado que un sistema no necesita ser creativo en intención para ser innovador en los resultados”

Steven Vogel: Ancas y Palancas: Mecánica Natural y Mecánica Humana, página 332 (Tusquets Editores, 2000).

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	10
THESIS SUMMARY	11
1. INTRODUCCIÓN, PROBLEMAS Y PREGUNTAS INICIALES	17
1.1. LA PREOCUPACIÓN SOCIAL Y CIENTÍFICA POR LA SOSTENIBILIDAD	18
1.1.1. Reuniones y Declaraciones Internacionales	18
1.1.2. Convenios Y Tratados De carácter Internacional	19
1.1.3. Agencias Gubernamentales (Nacionales e Internacionales)	20
1.1.4. Organizaciones No Gubernamentales	20
1.1.5. Revistas Y Publicaciones Académicas	21
1.1.6. Optimismo Y Pesimismo Tecnológico	23
1.1.7. La Pérdida De La Biodiversidad Y Su Relación Con El Proceso De Desarrollo Económico	26
1.2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS	31
2. LOS INDICADORES MACROECONÓMICOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y LA EVALUACIÓN EMPÍRICA DE LA SOSTENIBILIDAD	43
2.1. INGRESO SOSTENIBLE DE HICKS	45
2.2. INGRESO SOSTENIBLE DE WEITZMAN – SOLOW - HARTWICK	45
2.3. INGRESO SOSTENIBLE DE FISHER – NORDHAUS - HARTWICK	46
2.4. INGRESO SOSTENIBLE DE DALY – COBB	46
2.5. MEDICIONES DE SOSTENIBILIDAD DÉBIL	48
2.5.1. Índice De Sostenibilidad Débil (Pearce-Atkinson)	49
2.5.2. Índice De Acumulación Neta De Capital	50
2.5.3. Índice De Ahorro Genuino	52
2.5.4. Medidas Del Ingreso De Fisher	55
2.6. MEDICIONES DE SOSTENIBILIDAD FUERTE	57
2.6.1. ISEW: El Índice De Bienestar Económico Sostenible	58
2.6.2. El Índice De “Huella Ecológica”	61
2.6.3. Índices De Flujos Materiales	63
3. UNA REVISIÓN CRÍTICA DE LOS MODELOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (I): MODELOS NEOCLÁSICOS	68
3.1.1. Modelos Con Sostenibilidad Del Tipo Solow – Hartwick	72
3.1.2. Modelos Con Restricciones Termodinámicas	78
3.1.3. Modelos De Crecimiento Endógeno	80
4. UNA REVISIÓN CRÍTICA DE LOS MODELOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (II): MODELOS DE ECONOMÍA ECOLÓGICA	89
4.1.1. El Capital Natural en la Economía Ecológica	90
4.1.2. El Concepto de Función Ambiental	91
4.1.3. Posibilidades de Sustitución y Complementariedad Tecnológica	92
4.2. SOSTENIBILIDAD FUERTE, MODELOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y POLÍTICA ECONÓMICA	94
4.2.1. Modelos De Estado Estacionario	94
4.2.1.1. El Modelo “Histórico” De Estado Estacionario	95
4.2.1.2. Un Modelo Matemático De Estado Estacionario	97
4.2.2. Modelos De Sostenibilidad Del Tipo Holling	99
4.2.3. Modelos No Lineales Y Sostenibilidad	100
4.2.4. Los Efectos Positivos Del Cambio Técnico y La Economía Ecológica.	103
4.2.5. Algunas Implicaciones Para La Modelización.	108

5. UNA REVISIÓN CRÍTICA DE LOS MODELOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (III): MODELOS DE ECONOMÍA EVOLUTIVA	111
5.2.1. <i>Modelos Eco - Evolutivos</i>	<i>116</i>
5.2.2. <i>Un Modelo Neo Austriaco</i>	<i>121</i>
6. EL APRENDIZAJE DEL CAPITAL NATURAL: ANTECEDENTES Y DESARROLLOS TEÓRICOS.....	127
6.4. ARTEFACTOS BIOLÓGICOS, CONOCIMIENTO Y APRENDIZAJE EN LOS PROCESOS DE CO - EVOLUCIÓN EN LA PERSPECTIVA DE LA ECONOMÍA ECOLÓGICA.....	145
6.4.1. <i>Las Diferencias Entre Técnica Y Tecnología: El Análisis De Joel Mokyr</i>	<i>151</i>
6.4.2. <i>Conocimientos, Aprendizaje e Innovación en La Teoría De Los Sistemas Nacionales De Innovación</i>	<i>153</i>
6.4.3. <i>El Concepto De Aprendizaje Del Capital Natural: La Propuesta De Olman Segura</i>	<i>155</i>
6.5. INCLUSIÓN, SEPARACIÓN Y SUPERPOSICIÓN DE LOS TIPOS DE APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL NATURAL: UN ANÁLISIS A PARTIR DEL DIAGRAMA DE VENN.	163
6.6. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN FINAL	166
7. EL APRENDIZAJE DEL CAPITAL NATURAL A TRAVÉS DE LA BIOINSPIRACIÓN	169
7.1. LA CONFLUENCIA DE LA BIOINSPIRACIÓN Y LA BIOMIMÉTICA EN EL AEROPLANO	170
7.2. FILTRACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS INSPIRADA EN LAS BALENAS: BALEEN FILTERS.	172
7.3. TECNOLOGÍA DE SELLAMIENTO BASADA EN LOS MOLUSCOS: JOINLOX	175
7.4. BIOINSPIRACIÓN BASADA EN LA GEOMETRÍA DE LA ESPIRAL: PAX SCIENTIFIC	177
7.5. LOCALIZACIÓN Y SELLADO DE FUGAS INSPIRADA EN EL PROCESO DE CURACIÓN DE HERIDAS EN LOS HUMANOS: PLATELET® TECHNOLOGY LEAK SEALER.....	180
7.6. LA LÓGICA DEL ENJAMBRE Y EL CONTROL DEL CONSUMO ENERGÉTICO: REGEN ENERGY MANAGEMENT SOLUTION	183
7.7. TECNOLOGÍA MARÍTIMA INSPIRADA EN LOS INSECTOS: SOLAR SAILOR (EL MARINERO SOLAR)..	186
7.8. BIOMIMÉTICA FALLIDA, BIOINSPIRACIÓN EXITOSA EN LOS TRAJES DE BAÑO SPEEDO FASTSKIN®. 189	189
7.9. EL ESCARABAJO COMO PRECURSOR DE LA SIERRA DE CADENA PARA CORTAR MADERA.	194
7.10. BIOINSPIRACIÓN BASADA EN LA AERODINÁMICA DE SEMILLAS AUTOGIROSCÓPICAS.....	196
8. EL APRENDIZAJE DEL CAPITAL NATURAL A PARTIR DE LA BIOMIMÉTICA	201
8.1. SISTEMAS BIOMIMÉTICOS DE REFRIGERACIÓN: EL CASO DEL EASTGATE CENTRE BUILDING	201
8.2. EL EFECTO LOTO: APRENDIZAJE BIOMIMÉTICO DE LA NANOTECNOLOGÍA	204
8.3. EMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN ENTRE LAS TELAS DE ARAÑA Y LAS AVES: ORNILUX	209
8.4. FORMA Y FUNCIÓN DE LAS AVES COMO SOLUCIÓN EN EL SECTOR DEL TRANSPORTE: EL TREN “SHINKANSEN”	213
8.5. TURBINAS DE VIENTO BASADAS EN LAS ALETAS DE LAS BALENAS: WHALEPOWER	215
8.6. PURIFICACIÓN DE AGUAS BASADA EN LA TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTOS DESDE EL REMOLINO NATURAL: VORTEX GENERATOR.....	218
8.7. EL SISTEMA DE APERTURA Y CIERRE DEL VELCRO®.....	222
8.8. TECNOLOGÍAS DE PRESERVACIÓN BIOLÓGICA A TEMPERATURA AMBIENTE BASADAS EN LA ANHIDROBIOSIS.	224
8.9. LOS CORALES COMO FUENTE DE INSPIRACIÓN.	229
8.10. LA SUPERPOSICIÓN DE LOS PROCESOS DE APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL NATURAL Y LA ALAMBRADA.....	233
9. LA BIOUTILIZACIÓN UNA FORMA DE APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL NATURAL BASADO EN LA INCORPORACIÓN DE PROCESOS Y COMPONENTES NATURALES.	237
9.1. NUEVOS MATERIALES DE EMBALAJE INDUSTRIAL MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE HONGOS: MUSHROOM®.....	237
9.2. HONGOS, ESTATINAS Y BIOUTILIZACIÓN AL SERVICIO DEL CONTROL DEL COLESTEROL	241
9.3. LA POLINIZACIÓN NATURAL Y LOS PROCESOS AGROINDUSTRIALES.....	249
9.4. EL CONTROL BIOLÓGICO DE PLAGAS INTEGRADO A LA AGRICULTURA	251

9.5.	EL ÁRBOL TAXUS BREVIFOLIA COMO FUENTE DE UN COMPUESTO ESENCIAL EN LAS TERAPIAS ANTICANCERÍGENAS.	256
9.6.	MEDICAMENTOS QUE INCORPORAN COMPONENTES BIOMARINOS.....	258
9.7.	TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN Y DESALINIZACIÓN DE AGUAS QUE INCORPORAN A LAS ACUAPORINAS NATURALES.	269
9.8.	EL POLIASPARTATO, UN BIOPOLÍMERO NATURAL DERIVADO DE LAS OSTRAS.	271
9.9.	EL MONSTRUO DE GILA COMO FUENTE PARA EL CONTROL DE LA DIABETES: BYETTA® EXENATIDE INJECTION.....	273
9.10.	BIORREMEDIACIÓN UTILIZANDO UNA PELÍCULA DE BACTERIAS: EL BIO-DOME.....	275
10.	POLÍTICA ECONÓMICA E INSTRUMENTOS PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE INNOVACIÓN: UN ANÁLISIS DE DINÁMICA NO LINEAL	279
10.1.	UN MODELO DE APRENDIZAJE DEL CAPITAL NATURAL EN UN SISTEMA HÍBRIDO DE INNOVACIÓN 280	
10.1.1	<i>Tecnologías Naturales Y Coeficientes Técnicos De Producción Natural.....</i>	<i>281</i>
10.1.2.	<i>Procesos De Aprendizaje Del Capital Natural En Un Sistema Input - Output.....</i>	<i>282</i>
10.1.3.	<i>El Aprendizaje del Capital Natural y el cambio técnico.....</i>	<i>287</i>
10.2.	POLÍTICA ECONÓMICA Y APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL NATURAL: LA TEORÍA DE CATÁSTROFES COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS.	288
10.2.1.	<i>La Catástrofe De Cúspide: Una Aproximación Geométrica</i>	<i>291</i>
10.3	UN ANÁLISIS NO LINEAL DE INTERACCIÓN TECNOLÓGICA A TRAVÉS DE UN MODELO DE TEORÍA DE CATÁSTROFES.....	307
10.3.1.	<i>El Uso De La Dinámica No Lineal.....</i>	<i>307</i>
10.3.2.	<i>La Necesidad De La Política Económica En Un Sistema Híbrido De Innovación: Una Aplicación Del Modelo De Cúspide.....</i>	<i>308</i>
10.4.	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN FINAL	317
11.	HACIA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE INCENTIVOS PARA LA SOSTENIBILIDAD DE LOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE INNOVACIÓN	319
11.1.	LA NECESIDAD DE UN SISTEMA DE DERECHOS DE PROPIEDAD PARA LA GESTIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO DE INNOVACIÓN.....	319
11.2.	ALGUNAS MEDIDAS DE POLÍTICA ECONÓMICA E INSTRUMENTOS ECONÓMICOS PARA EL MANEJO DE LA BIODIVERSIDAD	327
11.2.1.	<i>Una Clasificación De Los Instrumentos Y Las Medidas De Política Económica Para El Manejo De La Biodiversidad.....</i>	<i>328</i>
11.3.	OTROS ELEMENTOS RELEVANTES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN E INCENTIVO DE LA INNOVACIÓN NATURAL.....	331
11.3.1.	<i>Contratos Que Hacen Compatibles El Aprovechamiento de la Biodiversidad y La Conservación.....</i>	<i>331</i>
11.3.1.1.	<i>Biotics Ltd.....</i>	<i>331</i>
11.3.1.2.	<i>El INBio</i>	<i>331</i>
11.3.2.	<i>Patentes Y Licencias Comerciales Ligadas a Fondos De Inversión.....</i>	<i>331</i>
11.3.2.1.	<i>El Fondo De Reconocimiento De Los Recursos Genéticos Y De Patentes Genéticas De Malí</i>	<i>332</i>
11.3.2.2.	<i>El Patentamiento Del Conocimiento Tradicional En La India.....</i>	<i>332</i>
11.3.2.3.	<i>El Fondo De Participación De Beneficios Monetarios y No Monetarios De Nigeria.</i>	<i>333</i>
11.3.2.4.	<i>Las Licencias De “Know – How”</i>	<i>333</i>
11.3.2.5.	<i>Las Reservas De Extracción</i>	<i>334</i>
11.3.2.6.	<i>Registros De Biodiversidad</i>	<i>335</i>
11.4.	ESPECIFICIDADES A TENER EN CUENTA EN EL CASO DE LA PROTECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS NATURALES.....	336
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	344

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Índice de acumulación neta de capital	52
Figura 2. Ahorro genuino por regiones I	54
Figura 3. Ahorro genuino por regiones II	54
Figura 4. Crecimiento sostenido en el nivel de PIB y en el nivel del GPI/ISEW entre 1950 y 1990	61
Figura 5. Tecnologías usadas por los homínidos	136
Figura 6. Comparación estructural entre una chimenea fabril y el trichophorum	140
Figura 7. Elementos comunes entre las máquinas moleculares y las máquinas humanas	140
Figura 8. Tecnología Humana - Juguete Azteca Con Ruedas Y Ejes.....	142
Figura 9. Tecnologías humanas y tipos de aprendizaje desde la naturaleza.....	164
Figura 10. Flujo de conocimiento e innovación	169
Figura 11. Superficie de la catástrofe de cúspide (despliegue universal)	292
Figura 12. Puntos críticos	292
Figura 13. Conjunto de catástrofes.	293
Figura 14. Conjunto de bifurcación y curva de cúspide	294
Figura 15. Conjunto de Catástrofe y línea de pliegue.....	295
Figura 16. Curva de solución.....	296
Figura 17. Curva de cúspide.....	296
Figura 18. Punto de intercepción de la cúspide No.1.....	297
Figura 19. Punto de intercepción de la cúspide No.2.....	298
Figura 20. Punto de intercepción de la cúspide No.3.....	298
Figura 21. Punto de intercepción de la cúspide No.4.....	299
Figura 22. Punto de intercepción de la cúspide No.5.....	299
Figura 23. Punto de intercepción de la cúspide No.6.....	300
Figura 24. Punto de intercepción de la cúspide No.7.....	300
Figura 25. Trayectoria en el espacio de parámetros (cambios en los parámetros).....	302
Figura 26. Propiedad de bifurcación en la catástrofe de cúspide.....	303
Figura 27. Propiedad de histéresis en la catástrofe de cúspide.....	304
Figura 28. Convención de Maxwell.....	305
Figura 29. Propiedad de divergencia en la catástrofe de cúspide	307
Figura 30. Curva de Cúspide para el sistema híbrido de innovación.	312
Figura 31. Punto de intercepción No.1 para el sistema híbrido de innovación	313
Figura 32. Punto de intercepción No.2 para el sistema híbrido de innovación	314
Figura 33. Punto de intercepción No.3 para el sistema híbrido de innovación	315
Figura 34. Punto de intercepción No.4 para el sistema híbrido de innovación	315
Figura 35. Punto de intercepción No.5 para el sistema híbrido de innovación	316
Figura 36. Trayectoria en el espacio de parámetros para el sistema híbrido de innovación.....	316

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tasas de extinción de especies.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2. Índices macroeconómicos de sostenibilidad.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 3. Índices estimados de sostenibilidad débil y fuerte.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 4. Tasas de ahorro sostenible estimadas.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 5. Variables ISEW – GPI.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 6. Índice de huella ecológica estimado (año 2002).....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 7. Biomimética, bioinspiración, bioutilización y definiciones relacionadas.</i>	<i>132</i>
<i>Tabla 8. Parámetros metodológicos para el análisis de tecnologías humanas basadas en tecnologías naturales.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 9. Tecnologías basadas en el aprendizaje desde el capital natural.....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 10. Ventas anuales en miles de dólares de Sierra de cortar madera.....</i>	<i>196</i>
<i>Tabla 11. Cementos de ortofosfato de calcio aprobadas por la FDA.</i>	<i>232</i>
<i>Tabla 12. Estatinas, fármacos que ayudan a la reducción del colesterol.</i>	<i>243</i>
<i>Tabla 13. Ventas globales de estatinas sintéticas desde 2008 a 2012.....</i>	<i>245</i>
<i>Tabla 14. Valor económico de las funciones, bienes y servicios ecosistémicos.....</i>	<i>247</i>
<i>Tabla 15. Valor económico de la polinización por región.</i>	<i>250</i>
<i>Tabla 16. Estudios de valoración económica mundial del control biológico de plagas.....</i>	<i>254</i>
<i>Tabla 17. Valor económico del control biológico de plagas.....</i>	<i>255</i>
<i>Tabla 18. Ventas mundiales de Taxol de BMS.....</i>	<i>258</i>
<i>Tabla 19. Productos médicos que usan componentes marinos.....</i>	<i>260</i>
<i>Tabla 20. Valor de Mercado de productos farmacéuticos.....</i>	<i>264</i>
<i>Tabla 21. Comparación entre agentes económicos naturales y humanos.</i>	<i>281</i>
<i>Tabla 22. Matriz de interacción económica entre sistemas natural y económico.....</i>	<i>281</i>
<i>Tabla 23. Catástrofes elementales de Thom.</i>	<i>291</i>
<i>Tabla 24. Medidas e instrumentos de política económica para la gestión de biodiversidad.</i>	<i>329</i>

THESIS SUMMARY

Title: Sustainable Development, Learning From Natural Capital and Technological Discontinuity.

Introduction

This research explores the relationship between sustainable development, innovation and the so called “learning from natural capital” process, which was still largely ignored by economists who study the sustainability policies topic. : the analysis of the capability to possess natural resources to provide technological goods and services oriented to the increase of the human (economic) welfare. This research will be considered as an exercise in persuasion it intends to call attention to certain specific economic issues (such as conditions of optimum use of technological resources from the Natural Capital, the need for an economic policy and application of appropriate instruments), through the use of appropriate analysis tools (evidence and models). We believe that, in this way, this investigation can be useful to illuminate certain aspects that are important for diagnosis, analysis and construction of appropriate responses regarding the process of "Learning from natural capital".

Objectives

The main objective of the discussed doctoral dissertation is to perform an analysis in order to identify the key instruments and economic policies to bear in mind the technological contribution derived from natural capital, so that the resources of biodiversity can be managed in a sustainable way. The main objective therefore, is to design a proposal for an economic policy, which places special emphasis on the particular case of Biodiversity, seen as a source of technological innovation.

Content and Results

The first part of this dissertation (chapters one to five) is focused to a synthetic exposure and a critical review of the way in which the models of "economic growth" incorporate environmental issues, doing particular emphasis on the treatment given to the concept of natural capital, as well as the main measures of environmental policy associated with each of these theoretical models (grouped as policies of strong and weak sustainability).

Chapter 1 explores several problems and questions that define the inquiry into the economic policies related to sustainable development, particularly designed to deal with technological knowledge, learning processes and technology arising from the natural capital.

Chapter 2 is dedicated to the review and assessment of the macroeconomic sustainable indicators and environmental economic accounting, developed in the context of environmental economics and the ecological economics approach, given its relevance in determining the economic criteria for the evaluation of sustainability related to certain economic (sustainable) objectives.

Chapter 3 reviews the neo classical models of sustainable development (Environmental Economics). These models are evaluated and shown that they have significantly strengthened its explanatory power, especially with the explicit incorporation of environmental constraints; while characterized by their reduced ability to analyze -in the narrow sense of the term- sustainable development (understood as a qualitatively different from economic growth economic process). Some important implications from the point of view of innovation technology are left out in this approach.

Chapter 4 is devoted to analyze approaches like "Steady State model" - which possess great strength in terms of the correct specification of the environmental restrictions, but have a basic weakness: his analysis of the processes of technological innovation is "indirect" or, at least, little explicit.

Chapter 5 states that the evolutionary economics models are capable to adapt environmental restrictions in the description of the process of economic growth and development. These economic models are capable of further modeling of processes of innovation (incremental and radical).

The overall conclusion in the first part of the doctoral dissertation is twofold. On one hand, we find that once evaluated these general approaches on the sustainable development processes, it can be seen remarkable progress in the explanatory power that economic discipline can provide about the sustainability problems; since, without exception, the various theoretical variants examined did include environmental variables and relevant models. Moreover, as we concentrate our attention on specific issues such as the role of natural capital, some limitations arise: in particular, it can be seen considerable interest in analyzing the effects of technology on the environment, but little interest in the study of the possible effects of the interaction between ecosystems and the economic

system in the innovation process. The finding of this kind of analytic asymmetry motivates largely the development of the second part of this research.

The second part of the thesis-corresponding chapters six to ten- is dedicated to develop an analysis related to the technological change and the natural capital. It is also submitting a proposal for economic policy geared towards creating economic incentive schemes for the effective protection of innovation capacity possessed by the natural capital.

Chapter 6 explores the relationship between natural capital and the economic innovation. Including the existence of the "naturfacts" (economic goods originate in natural technologies which serve as evolutionary ancestor to the development of goods, services and human technologies) and their ability to benefit in the economic system, arise various ways in which technologies, goods and services use nature as inspiration, as a benchmark for the design, or technological input. This phenomenon is called, in general, "biomimicry" and includes several related names ("bio-inspiration", "biomimicry", "bionic" among others). Finally, this chapter states the process of "Learning from natural capital", through the analysis of thirty examples of human technologies based on natural technologies. To summarize, we can say that the analysis of the technological trajectories presented, using a Venn diagram, indicates that there are three types of learning (bio-inspiration, biomimetics and bioutilization) from nature that characterize the transfer of technological knowledge from natural ecosystems into the system human economic and that these three types of learning often occur simultaneously (overlap) in the development of technologies, products and services.

Chapter 7 presents the bioinspiration process as a flow of knowledge coming from nature, in which the information obtained from the natural environment, or the understanding of some critical aspect of some biological activity allow human beings to create innovative products. Bioinspiration is the first form of knowledge from the natural capital that will be addressed extensively through the analysis of products developed by humans, arising from the use of technological solutions observed in nature. Species like birds, sharks, mollusks, whales (among others) served as relevant biological artifacts for the consolidation of human technologies are described. It illustrates the ways through bioinspiration was established as a strategy to creation or design of products manufactured by humans through the adaptation of natural functions and mechanisms.

Chapter 8 proposes that biomimetics can be understood as a second specific form of learning from the natural capital. Unlike bioinspiration (harnessing the natural reference as a creative analogy) or bioutilization (functional incorporation of a natural technology), biomimetics is aimed at implementing a kind of "reverse engineering", replicating the

form, the function, structure, materials, or the characteristic mechanisms in natural processes. To the detailed analysis, ten biomimetic technologies are presented, which represent innovations in such diverse fields as architecture and design, transportation, refrigeration, or the preservation of biological samples, drugs and vaccines, among others.

Chapter 9 allows to analyze various processes using a natural component in order to functionally integrate a technology, good or service developed by humans. This natural compound may be a molecule (Acuaporin), a substance (Statins, Taxol, Byetta and Drug biomarine), an organism or population (Mushroom, Biodome), or ecosystem function (pollination and biological pest control), among other. Similarly, the integration of the various natural components can occur at different scales (molecular, cellular, organism or ecosystem level, for example). Bioutilization process constitutes a third embodiment of learning from natural capital.

Chapter 10 proposes a dynamic model (input – output) in which growth related economic and learning processes from natural capital. It presents an application of catastrophe theory of René Thom and dynamic analysis tool. Thom elementary catastrophes are presented using Mathematica 8.0 program, especially cusp catastrophe, which serves as a basis for analysis of the hybrid system of innovation. The proposed model assumes a basic structure of the production process with a cubic function costs. The model presents a combination of market prices (for human producer) and natural prices (for natural producer), in a context in which the human producer makes use of natural technologies without recognizing in principle, remuneration or compensation to producers natural, so market share remains in the shade and nothing guarantees that the dynamic is sufficient to avoid a situation of irreversible environmental damage, so it must be ensured, from an agent or outside agency, optimum compensation for natural agent. We conclude that economic policy is necessary to ensure the provision of goods and services from natural production system. The structure of such a policy should involve adequate dynamic incentive compensation based on natural agents.

Chapter 11 considers the set of specific instruments that could be applied in the management of hybrid systems innovation. The question of whether there should be the institutions for the effective protection of property rights to preserve the innovative capacity from natural agents. It is argued that this specific type of innovation requires the application of protection and compensation schemes in order to have an incentive framework to ensure continuity in the natural process of production and innovation.

Conclusions

Natural capital can be considered as a primary source of innovation, as a "first to invent" involved in the process of finding technological solutions. The preservation of the innovative capacity of the natural capital should be included as one of the objectives of environmental and sustainability policy. Three types of technological learning can be identified from the natural capital, called bioinspiration, biomimetics and bioutilization, which can be classified by an analysis from the Venn diagram, which makes it possible to understand the occurrence of processes of differentiation, separation and overlap types of learning from the natural capital. The analysis of the trajectories of the thirty technologies presented indicates that learning sequences appear not always keep the same order and biomimetic approaches are a subset of the bioinspiration. The concepts of "naturfact" (natural technology), "nature-based technologies" and "learning from natural capital", are susceptible to modeling based on dynamic models (input-output, cusp catastrophe) showing the nonlinear and complex nature of this phenomenon (hybrid innovation system). The need for implementing economic policies that will maintain the innovation capacity of natural ecosystems is a broad conclusion of the chapter. From the point of view of economic policy, it is necessary to acknowledge the intellectual property that has a natural agent on natural technology developed; because the natural agent involved in the process of economic interaction as "passive" agent, a practical way to enforce this right can be the transfer of management to a social agent that may have the legal capacity to represent the natural agent. From the point of view of policy implementation, once we have reviewed the systems protecting biodiversity actually applied in different regions and countries, the most reasonable scheme could be the establishment of a management system "mixed" allowing involve public and private agents representing each of the levels of use and exploitation of resources (private natural agents, local communities, farmers, breeders, fishermen, scientists and public research institutes, public universities and , research and development laboratories, local and national governments); thereby configuring a multilateral context in which intellectual property schemes use mechanisms such as international agreements.

CAPÍTULO I

Introducción, Problemas Y Preguntas Iniciales

1. Introducción, Problemas Y Preguntas Iniciales

El problema económico al que tradicionalmente denominamos “Sostenibilidad” se refiere, en general, al análisis de la viabilidad de los procesos de crecimiento y desarrollo económico a largo plazo, en el sentido de que debe tenerse en cuenta que éstos no sobrepasen las posibles restricciones derivadas de su interacción con los recursos que ofrece el medio ambiente. Como es apenas natural, en la evolución del análisis económico de la sostenibilidad pueden encontrarse algunas áreas en las que existe un relativo consenso y otras en las que persiste un abierto desacuerdo. Quizá la mejor ilustración de tal situación está dada por el debate que ha suscitado la propia definición del concepto de “Desarrollo Sostenible”. Aunque la definición asumida por la Comisión Mundial para el Medio Ambiente de la Organización de las Naciones Unidas¹ es la más difundida y se acepta –generalmente- como punto de referencia para la discusión contemporánea sobre la aplicación práctica de los principios inherentes a la sostenibilidad, los economistas que se han ocupado del tema –en especial aquellos que utilizan modelos- suelen ofrecer sus propias definiciones, con lo que las prescripciones de política económica exhiben notorias divergencias.

El término “Desarrollo Sostenible” hace referencia, necesariamente, a una definición amplia que sólo puede adoptar un significado preciso en el contexto de teorías y modelos específicos; por ejemplo, los modelos de “sostenibilidad débil” y “sostenibilidad fuerte”, generalmente asociados a la “Economía Ambiental” y la “Economía Ecológica”, respectivamente.

Tal y como ha sido puntualizado por Arrow et al. (2004), en principio, los economistas contamos, al menos, con dos versiones claramente diferenciadas para referirnos a los problemas propios del desarrollo sostenible: de una parte contamos con el criterio de “Maximización”, que se refiere al bienestar económico relacionado con patrones de consumo óptimos (en este caso la sostenibilidad significa que una determinada función que representa la suma de la utilidad descontada, la cual no debe decrecer en el tiempo).

De otra parte, la sostenibilidad puede ser interpretada como el mantenimiento de la base productiva de la sociedad, representada como la suma de los activos que componen el capital total.

¹ El Desarrollo Sostenible es el Desarrollo que alcanza las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para alcanzar sus propias necesidades (WCED, 1987).

En tanto que el primero de los criterios –expresado en términos de Bienestar- hace énfasis en la maximización de la utilidad, el segundo –expresado en términos de activos de capital- hace énfasis en la equidad intergeneracional. Este énfasis en objetivos diferentes implica, finalmente, que el cumplimiento de un criterio no sea garantía del cumplimiento del otro; esta situación ilustra las dificultades propias del intento de establecer una definición unívoca de términos como sostenibilidad y desarrollo sostenible.

La necesidad de establecer de manera clara cuáles serían los límites y posibilidades de un sistema económico y social que, de hecho, está en permanente interacción con el medio ambiente, es un problema que de manera persistente fue constituyéndose como una de las preocupaciones sociales más importantes a lo largo del siglo XX.

El reconocimiento de una problemática medio ambiental compleja, que está relacionada indudablemente con los impactos ambientales negativos derivados de las acciones humanas sobre la red de recursos naturales y ecosistemas del planeta se ha constituido en un punto de referencia insoslayable para los estudiosos de éste problema, pues refleja en buena medida la existencia de aspectos conflictivos propios del proceso de desarrollo económico, a la vez que revela la necesidad de pensar en el diseño de un conjunto de medidas eficaces de Política Económica.

1.1. La Preocupación Social Y Científica Por La Sostenibilidad

La preocupación por la conservación de las funciones vitales del medio ambiente en el planeta , en un contexto de crecimiento económico, ha sido objeto de intensos debates institucionales y científicos, tales como las reuniones internacionales dedicadas al estudio de estos problemas medioambientales, que han dado lugar a transformaciones en la arquitectura de las instituciones de cooperación internacional, a cambios profundos en la agenda de los gobiernos; a innovaciones en las prácticas empresariales y, por supuesto, a modificaciones en las prioridades de los científicos, incluidos los economistas. A continuación, ofrecemos una reseña –indicativa- de estos procesos de transformación.

1.1.1. Reuniones y Declaraciones Internacionales

La comunidad internacional, en consonancia con la mencionada preocupación social, ha propiciado la formación de foros específicos para la discusión de los problemas económicos –ambientales-, los cuales progresivamente han adoptado un carácter cada vez más universal. Un ejemplo de ello son las Conferencias Mundiales Sobre el Medio Ambiente auspiciadas por la Organización de Las Naciones Unidas cada 20 años desde

1972, que han dado origen a acuerdos surgidos del consenso de buena parte de los participantes:

- Declaración De Principios del Consejo de Europa sobre la lucha contra la contaminación del aire (Estrasburgo, 1968)
- Carta del Agua del Consejo de Europa (Estrasburgo, 1968)
- Conferencia sobre la Biosfera de la UNESCO (1968)
- Conferencia Mundial Sobre el Medio Humano (Estocolmo, 1972)
- Carta de Suelos del Consejo de Europa (Estrasburgo, 1972)
- Estrategia Mundial para la Conservación de la UICN (1980)
- Estrategia Mundial para la Conservación de la UICN, PNUMA y WWF (1991)
- Informe de la Conferencia de Naciones Unidas Sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (1987)
- Convenio para la Conservación de la fauna y la Flora (1993)
- Conferencia Mundial Sobre el Medio Ambiente de Río (1992)
- Conferencia Mundial Sobre el Medio Ambiente de Johannesburgo (2002)

Como uno de los resultados más sobresalientes que han producido las conferencias multilaterales, pueden citarse una diversidad importante de tratados y convenios que pretenden la implementación gradual de las medidas, objetivos e instrumentos propuestos:

1.1.2. Convenios Y Tratados De carácter Internacional

- Convención Pesquera (Ginebra, 1958)
- Convenio Internacional sobre Humedales (Ramsar, 1971)
- Convención sobre el comercio internacional de especies amenazadas de Fauna y Flora (Washington, 1973)
- Convenio de Contaminación Atmosférica Trans - fronteriza: (Ginebra, 1979)
- Convenio de Las Maderas Tropicales (Ginebra, 1983)
- Convenio para la Protección de la Capa de Ozono (Viena, 1985)
- Convención Marco de la ONU sobre el Cambio Climático (Nueva York, 1992)
- Convenio sobre la Biodiversidad Río de Janeiro, 1992)
- Protocolo de Kyoto (1998)

Este proceso ha implicado, igualmente, un conjunto de transformaciones institucionales de tipo gubernamental y estatal: la creación de Agencias Gubernamentales de Protección

Ambiental y Ministerios del Medio ambiente en muchos países es una muestra de esta tendencia:

1.1.3. Agencias Gubernamentales (Nacionales e Internacionales)

- Environmental Protection Agency –EPA- (Estados Unidos de América)
- European Environmental Agency –EEA-
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente –PNUMA-
- Comisión de Las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible (CNUMAD)
- Ministerios del Medio Ambiente en diversos países (Austria, Canadá, Colombia, Rep. Checa, Dinamarca, Holanda, Francia, son algunos ejemplos).

Finalmente, es importante señalar la aparición de una amplia red de Organizaciones No Gubernamentales dedicadas al estudio de éste tema, que reflejan un nivel creciente de institucionalización de la preocupación económico – ambiental derivada de la sociedad civil:

1.1.4. Organizaciones No Gubernamentales

- Unión Internacional Para La Conservación de la Naturaleza –UICN-
- World Wild Fund –WWF-
- Greenpeace
- Earth Council
- Friends of The Earth
- The WorldWatch Institute
- Redefining Progress

De otra parte, desde el punto de vista particular de la disciplina económica ha surgido, con una consistencia cada vez mayor, un área de discusión específicamente dedicada a temas relacionados con el desarrollo sostenible, que ha madurado hasta el punto de dar origen a una verdadera sub - disciplina.

Si bien es cierto que la Economía como disciplina científica desde sus inicios ha mostrado preocupación por los problemas ambientales -los economistas clásicos se ocuparon del tema-: Thomas Malthus de la escasez de alimentos; Stanley Jevons del agotamiento del carbón, Alfred Marshall reflexionó acerca del valor económico del agua, son muestra de

ello- es menester reconocer que los economistas modernos nos han legado trabajos importantes, que constituyeron -en principio- la base de los análisis contemporáneos, por ejemplo, referidos al estudio de los recursos agotables -Harold Hotelling en la década de los años treinta-.

Es sobre todo, en el último cuarto del siglo XX, cuando se ha hecho manifiesta la consolidación de la Economía Ambiental y la Economía Ecológica, con la aparición de un flujo continuo de trabajos que han explorado sistemáticamente los problemas específicos (economía de los recursos agotables, de los recursos renovables, equidad Inter. – generacional, etc.); que constituyen el foco de atención de los trabajos actuales y han permitido el desarrollo y la aplicación de instrumentos teóricos coherentes (el diseño de métodos específicos de valoración ambiental o la aplicación de principios bio – físicos a la modelización- que solo son alcanzables a través de niveles crecientes de profundización analítica.

En síntesis, puede decirse sin lugar a dudas que estamos en presencia de la evolución de una sub - disciplina que alcanza rápidamente una robustez analítica considerable, de la que podemos hacernos una idea aproximada si observamos el crecimiento que han experimentado las publicaciones dedicadas a temas económico – ambientales.

1.1.5. Revistas Y Publicaciones Académicas

- Journal of Environmental Economics and Management
- Ecological Economics
- Journal of Environment y Development
- International Journal of Sustainable Development
- Journal of Environmental Planning and Management
- The International Journal of Sustainable Development and World Ecology
- Land Economics

Los interesados en la Política Económica tenemos, pues, un contexto caracterizado por un cierto consenso reflejado en el reconocimiento social de la existencia de problemas ambientales, y tiene cierta correspondencia con la preocupación de los economistas - cuando menos de aquellos dedicados al trabajo en áreas tales como el Crecimiento Económico, la Economía de los Recursos Naturales o la Economía de La Contaminación- a la vez que mantenemos un amplio desacuerdo respecto de aspectos fundamentales tales como:

- I. El Diagnóstico; es decir, la verificación empírica de evidencia que permita identificar las tendencias, las dimensiones alcanzadas por los problemas ambientales causados por la economía. Preguntas tales como ¿la dimensión alcanzada por los impactos ambientales negativos permite -o no- hablar de una “crisis” o una “catástrofe” ambiental y económica inminente?
- II. El Análisis; mediante la aplicación de aproximaciones teóricas que nos permitan deducir qué tipo de modelos -con qué clase de propiedades y condiciones específicas- son los adecuados para el estudio de dichos problemas ambientales.
- III. La Respuesta; de manera coherente con los puntos anteriores, se trata del intento de descubrir qué opciones de Política Económica debemos aplicar para intentar solucionar de manera eficaz los problemas medio ambientales identificados y analizados.

Esta mezcla de circunstancias internas y externas hace que sea necesaria la elaboración de diversas aproximaciones racionales, que nos permitan ofrecer desde el punto de vista muy particular de la disciplina económica un conjunto de soluciones útiles para el resto de la comunidad científica y para la sociedad en general.

Este trabajo de Tesis Doctoral es, en esencia, una investigación dirigida a llamar la atención sobre un aspecto del desarrollo sostenible que ha sido soslayado aún por buena parte de los economistas dedicados al estudio de los problemas propios de la sostenibilidad: el análisis de la capacidad que poseen los recursos naturales para proveer bienes y servicios de carácter tecnológico que influyen de manera positiva en el incremento del bienestar económico humano.

Es éste, en consecuencia, un trabajo que esperamos sea considerado como un ejercicio de persuasión que se propone llamar la atención hacia determinados problemas económicos específicos:

- Las condiciones de utilización óptima de los recursos tecnológicos provenientes del Capital Natural,
- La necesidad de utilizar la Política Económica,
- La aplicación de los Instrumentos adecuados

Mediante el empleo de las herramientas de análisis (evidencia y modelos) apropiados. Creemos que, de ésta manera, nuestro trabajo puede ser útil para iluminar ciertos aspectos que son importantes para el diagnóstico, el análisis y la construcción de respuestas adecuadas, puesto que en buena medida se ocupa de señalar la interdependencia existente entre las políticas económicas ambientales y algunos conceptos teóricos que han sido insuficientemente elaborados -por ejemplo el concepto de “Aprendizaje Del Capital Natural”- pero que pueden ser de vital importancia, dada su influencia en la percepción que cada teoría y cada modelo de desarrollo sostenible tienen de la compleja problemática económico – ambiental que debemos afrontar como sociedad.

La evaluación empírica de la sostenibilidad, puede ser asumida como origen de algunos interrogantes propios de la política económica y tiene como una de sus características sobresalientes la variedad de diagnósticos existentes, que se sitúan en extremos que van desde el pesimismo extremo (estaríamos acercándonos a una catástrofe ecológica), hasta el optimismo extremo (estaríamos en una situación en la que, literalmente hablando, no existen problemas ambientales graves)².

1.1.6. Optimismo Y Pesimismo Tecnológico

Entre las evaluaciones pesimistas o –cuando menos- no optimistas, pueden destacarse los realizados por el “Club de Roma” y algunos de los autores más representativos de la Economía Ecológica. En el libro Más allá de los Límites “Beyond The Limits” de Meadows, Meadows y Randers (1992), una actualización del informe “The Limits to Growth” original, en el que se alertaba sobre el agotamiento y deterioro inminente de recursos naturales importantes en el planeta, presentan una actualización del informe inicial de 1972, y concluyen que:

“Los límites, seamos claros, son para el transumo. Son límites de velocidad, no límites de espacio, límites a las tasas de flujo, no límites a la cantidad de personas o la cantidad de capital (al menos directamente). Ir más allá de ellos no significa toparse con una pared absoluta. Incluso puede significar que los transumos de materiales y pueden seguir creciendo aun, antes de que las retroalimentaciones negativas debidas a las fuentes y sumideros sobre – explotados decaigan” (Meadows et al. 1992:99).

² No obstante, es necesario señalar que es posible encontrar áreas de convergencia entre estas escuelas que, en principio parecen opuestas: un ejemplo de integración entre el análisis neoclásico de la sostenibilidad y algunas propuestas de la economía ecológica puede encontrarse en Stern (1997).

Desde el punto de vista situado en el espectro “pesimista”, aún asumiendo que fuese un hecho comprobado que en la actualidad muchos insumos naturales y sumideros están siendo explotados más allá de su capacidad de carga, es necesario reconocer que existen posibilidades de reducir la presión sobre el medio ambiente a través del cambio técnico y las mejoras en eficiencia relativas a la explotación de recursos naturales.

Algunos de los más representativos autores de la Economía Ecológica afirman, que el sub-sistema económico ha alcanzado y superado límites ambientales relevantes, pero reconocen un cambio de énfasis respecto de la identificación de las prioridades, que han pasado desde la preocupación por el agotamiento de recursos minerales y energéticos (el problema de la fuente) a la preocupación por la contaminación generalizada (el problema del sumidero):

“Desde los “límites del crecimiento” del Club de Roma en 1972, el énfasis se ha desplazado de los límites en la fuente a los límites del sumidero. Los límites en la fuente están más abiertos a la sustitución, son más susceptibles al control de los mercados mediante la propiedad privada, y son más localizados”. (Costanza et al. 1997:8).

Para ellos, hay cinco grandes procesos que son evidencia de que los límites ecológicos se están sobrepasando, a saber:

1. La apropiación humana de biomasa ha alcanzado una dimensión del 40% del total, con el tamaño poblacional actual; creando así conflictos de recursos entre los humanos y las demás especies,
2. El cambio climático, considerando la alta variabilidad inducida por los humanos y el calentamiento global del planeta,
3. La ruptura de la capa de ozono, que paulatinamente se ha hecho global, y tiene consecuencias negativas para la salud de todas las especies que ocupan el planeta,
4. La degradación de la tierra en términos de erosión,
5. la pérdida acelerada de biodiversidad.

Este tipo de diagnóstico suele estar asociado, generalmente, a la conclusión de que el crecimiento económico tiene límites en el largo plazo, y aún a mediano plazo.

Por su parte, el análisis Neo-Clásico de los problemas ambientales ofrece una variedad de diagnósticos que van desde el optimismo radical de autores como Julian Simon, según el cual estamos muy lejos de alcanzar un estado de crisis ambiental o una situación que pueda calificarse de “límite”:

“Tomado en el amplio y una necesidad mayor de recursos usualmente nos deja con una mayor capacidad para conseguirlos, porque adquirimos conocimiento en el proceso. Y no hay un límite físico significativo -incluso el tamaño de la tierra- frecuentemente mencionado a nuestra capacidad para seguir creciendo para siempre. Sólo hay un recurso importante que ha mostrado una tendencia de creciente escasez en lugar de aumentar la abundancia. Ese recurso es el más importante de todos - los seres humanos-.”(Simon 1996).

y se extienden hasta el optimismo moderado de autores como William Nordhaus, quien cree que los efectos positivos del progreso tecnológico pueden ser suficientes para contrarrestar los efectos nocivos del desarrollo económico, aunque reconocen algunas limitaciones en las conclusiones alcanzadas por el modelo Neo – Clásico estándar de crecimiento económico, que deja de lado factores importantes como la incertidumbre relacionada con el cambio climático, y problemas decisivos como el de la pérdida de biodiversidad.

También algunos análisis empíricos de corte Neo-Clásico (Barnett y Morse 1963) han mostrado que no hay razones para hablar de crisis ambiental, si por ésta se entiende una tendencia al agotamiento de los recursos naturales a largo plazo: la evidencia empírica muestra que los precios de las materias primas han bajado, con lo que puede decirse que las cantidades de recursos naturales, en términos relativos, son cada vez menos escasas. A partir de una crítica del modelo económico de “límites al crecimiento”, William Nordhaus (1995) ha mostrado que un modelo pesimista de crecimiento económico puede exhibir resultados opuestos al colapso o aún al declive, si se asume el efecto positivo del cambio técnico: sus resultados sugieren que sólo una fracción pequeña de la caída en productividad en la economía de los Estados Unidos de Norteamérica puede atribuirse al agotamiento de los recursos naturales, en tanto que sus estimaciones empíricas para la economía mundial confirman las tendencias ya anunciadas por Barnett y Morse, pues muestran que los recursos naturales han sido menos escasos que el trabajo, en un horizonte de análisis temporal correspondiente a un siglo. Su análisis de las tendencias futuras del desarrollo sostenible es igualmente coherente con las tendencias observadas en el pasado: tomando en cuenta factores medioambientales como el efecto invernadero, la polución local, y el agotamiento de los recursos renovables y no renovables, Nordhaus encuentra que, en un horizonte temporal de 70 años (1980-2050), la tasa de crecimiento per - cápita anual disminuye solo en 0,0029%; es decir, pasa de 1,6% a 1,29%. Su conclusión es, en consecuencia, que las restricciones ambientales al crecimiento económico en el futuro son pequeñas.

El examen de los conceptos que sustentan las evaluaciones de la sostenibilidad de carácter macroeconómico, revela que las conclusiones alcanzadas dependen

sensiblemente del tipo de variables y factores específicos que sean incluidos. Este hecho es notorio cuando se trata de determinar el tipo de relación que tienen en el largo plazo el crecimiento económico y la degradación ambiental. Un ejemplo de esta situación puede encontrarse en las evaluaciones que emplean la llamada “Curva Ambiental de Kusnetz”, cuyo objetivo es encontrar si la relación entre el crecimiento económico y la degradación es positiva (el crecimiento económico no es perjudicial para el medio ambiente) o negativa (el crecimiento económico es perjudicial para el medio ambiente).

Las revisiones comparativas de este tipo de literatura permiten constatar que (Yandle et al. 2004):

1. La curva ambiental de Kusnetz, puede adoptar la forma de una letra “U”, con lo que tendríamos que a largo plazo los efectos adversos de la degradación ambiental que puede atribuirse al proceso de desarrollo económico no son atenuados
2. En los casos en los que se confrontan indicadores de ingreso con variables estándar de degradación ambiental (por ejemplo aire, agua, energía) la relación encontrada adopta la forma de una curva en U invertida, lo que implica que en el proceso de desarrollo económico causa niveles crecientes de daño ambiental en sus fases iniciales hasta llegar a un nivel máximo, después del cual la agresión al medio natural es decreciente. Tenemos, entonces, una situación en la que, a largo plazo, es posible hacer compatibles los niveles de degradación con el crecimiento económico.
3. En los casos en los que se confrontan indicadores de ingreso con indicadores no tradicionales de degradación ambiental, las conclusiones optimistas se ven seriamente afectadas, especialmente cuando se tiene en cuenta un factor especialmente complejo: la Biodiversidad.

1.1.7. La Pérdida De La Biodiversidad Y Su Relación Con El Proceso De Desarrollo Económico

Para empezar, puede resultar especialmente útil, definir nuestro objeto de interés. El Comité de valoración económica y no económica de la biodiversidad del Consejo Nacional de Investigación de los Estados Unidos de Norteamérica, nos ofrece la siguiente definición:

“La biodiversidad incluye no sólo a las especies del mundo con sus historias evolutivas únicas, sino también la variabilidad genética dentro y entre poblaciones de especies y la distribución de las especies a través de hábitats, ecosistemas, paisajes y continentes u océanos enteros locales” (NRC 1999:20).

Que reconoce como componentes individuales, a los genes, las especies y los ecosistemas.

Respecto de las formas de medirla, puede decirse que existen diversas posibilidades de definir variables pertinentes:

1. Número total de especies
2. Abundancia relativa de especies en una muestra
3. Diversidad Alfa: Número de especies en un área dada (medida más simple), diversidad intra área, denominada "riqueza de especies".
4. Medidas subrogadas: número de géneros

El valor Biológico de una especie se refiere a 5 criterios esenciales:

1. Riqueza o número de especies por unidad de área.
2. Endemismo,
3. Servicios prestados por los Ecosistemas,
4. Existencia de especies Individuales con la capacidad de influenciar funciones o servicios ecosistémicos de importancia par los humanos.
5. Estatus de "Protegido", entre otros.

La inclusión explícita de indicadores de biodiversidad en estimaciones econométricas ha sido abordada en un reciente trabajo de Asafu-Adjaye(2003) en el que se hace un análisis de corte transversal para 100 países (25 de alto ingreso, 25 de medio, 50 de bajo), y se usan aproximaciones cuantitativas a los niveles de pérdida en variables representativas de los cambios experimentados por la Biodiversidad, representada por las siguientes variables:

- Mamíferos
- Aves
- Plantas
- Porcentaje De Aves Y Mamíferos En Peligro De Extinción
- Tasa Media De Cambio Anual En El Número De Mamíferos Registrados

Frente a los siguientes factores causantes de la pérdida:

- Tamaño de Hábitat
- Presión Poblacional

- Clima
- Nivel De Ingreso
- Composición De La Producción
- Nivel De Libertad Económica
- Política Ambiental Macroeconómica

El estudio encuentra que, en general, puede decirse que el crecimiento económico tiene efectos adversos sobre la Biodiversidad, y que el tipo de crecimiento, que – a su vez – depende de la composición del ingreso, es significativo, puesto que los países con una participación alta de la agricultura en el producto –generalmente de bajo ingreso– experimentan una disminución de la biodiversidad grande.

Estas observaciones, acerca de los complejos problemas que puede traer para la viabilidad del desarrollo económico en el largo plazo la disminución del potencial propio de la biodiversidad, de alguna manera coinciden con las posiciones asumidas por algunos científicos que sostienen que los procesos de desarrollo están ocasionando una catástrofe en la biosfera, que se evidencia en la extinción masiva de otras especies, inducida por los humanos³.

Al respecto según datos de Leakey y Lewin (1998), los humanos estamos provocando la primera extinción masiva de especies en el planeta tierra causada por una especie singular⁴. Esta tendencia se atribuye al hecho de que generamos ritmos de extinción de especies superiores a los que cabría esperar si se cumplieran los ritmos evolutivos de largo plazo o larga duración. La idea es sencilla pero impactante. Si establecemos una comparación entre los ritmos de extinción actuales y los de fondo, podremos evaluar si estamos superando, o igualando los ritmos de equilibrio. Los datos disponibles muestran que, en el mejor de los escenarios, actualmente estaríamos multiplicando por 68.000 veces el ritmo de extinción de fondo, en tanto que si consideramos el escenario medio, lo estaríamos multiplicando por 200.000 veces, y sí consideramos el escenario de mayor intensidad, el ritmo actual sería 400.000 veces mayor que el de extinción de fondo. El hecho inquietante que arroja esta evidencia, es que cualquiera de los tres casos puede ser considerado como una auténtica catástrofe ecológica.

³ La introducción de especies extrañas en ecosistemas, es también una de las causas más preocupantes de la pérdida de Biodiversidad.

⁴ Las otras grandes extinciones (cinco) probablemente tuvieron una causa natural, probablemente por impactos de asteroides sobre la tierra, y parece ser que ocurren aproximadamente cada 26 millones de años, por lo que la siguiente debería ser en unos trece millones de años.

Con el ánimo de establecer datos que puedan servir de contraste, es posible consultar otras estimaciones de las tasas de extinción de la biodiversidad, en las cuales queda claro que los porcentajes esperados son realmente altos y, por tanto, preocupantes:

Tabla 1. Tasas de extinción de especies

ESTIMACIONES DE LAS TASAS ACTUALES DE EXTINCIÓN DE ESPECIES		
ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE ESPECIES (%)	BASE	FUENTE
33–50 por año-2000	Pérdida de superficie forestal	Lovejoy (1980)
50 por año 2000	Pérdida de superficie forestal	Ehrlich (1981)
25–30 en el siglo XXI	Pérdida de superficie forestal	Myers (1989)
33 en el siglo XXI	Pérdida de superficie forestal	Simberloff (1986)

Fuente: Pearce y Moran (1994)

De otra parte, resulta especialmente inquietante el papel que desempeñan los incentivos e instrumentos de política económica: tal es el caso de una parte de los subsidios –los cuales han sido, con cierta frecuencia, denominados “subsidios perversos”, puesto que fomentan la sobreexplotación de los recursos naturales y en particular de la biodiversidad. Algunos de los sectores de actividad económica relacionados directamente con las pérdidas de biodiversidad son la agricultura, la irrigación, el cultivo de cereales, el sector energético, la pesca, la industria maderera, entre otros (Bagnoli 2003).

La dimensión de los subsidios perjudiciales para la explotación óptima de los recursos naturales y del medio ambiente ha sido estimada en 1.450 billones de dólares para la economía mundial, en un estudio del International Institute for Sustainable Development:

“Las subvenciones totales se estiman en alrededor de \$ 1.900 billones (de dólares) al año, y los subsidios perversos en \$ 1.450 billones (de dólares) al año. Claramente, entonces, los subsidios perversos tienen la capacidad de (a) ejercer un impacto muy distorsionador en la economía global de de \$ 28.000 mil millones, y (b) infligir perjuicios a gran escala en nuestros ambientes. En ambos casos, fomentan el desarrollo insostenible” (Myers y Kent 1998: 16).

El tamaño, sin duda, considerable de éste tipo de incentivo ha llevado a algunos autores, a proponer su eliminación o al menos su disminución, con el fin de destinarlos a programas de protección ambiental; Alexander, Gaston y Balmford (1999) han propuesto un programa para la conservación de la Biodiversidad que costaría 300 billones de dólares al año, mucho menos la cantidad que los gobiernos del planeta dedican a subsidios perjudiciales al medio ambiente.

Adicionalmente, los costos de protección de la Biodiversidad podrían alcanzar costos significativos. Para Lewandrowski et al. (1999), la protección de un 5% del área total del planeta reduciría el gdp mundial en 45.5 billones de dólares de 1990, la de un 15% lo reduciría en 93.3 billones de dólares de 1990, y en escenarios de coberturas mayores podría alcanzar los 143.8 billones de dólares de 1990: Estaríamos hablando de entre un 44% y un 88% del producto total mundial.

Las estimaciones del valor de los servicios ambientales también podría dar idea acerca de los costos de oportunidad que conlleva el proceso de pérdida de los recursos ecosistémicos; para Costanza et al. (1997) el valor estaría en un rango de entre 16 y 54 trillones de dólares por año para 17 servicios ecosistémicos, para Alexander et al. (1998) el valor total de los servicios ecosistémicos puede alcanzar entre 44 y 88% del PNB mundial. Para Pimentel et al. (1997) el valor de los beneficios ofrecidos por los ecosistemas globales se estima en un valor que oscila entre 300 y 3000 billones de dólares al año.

Cuando menos, dos cuestiones deben ser resaltadas después de esta revisión de las evaluaciones y diagnósticos de las posibilidades de alcanzar trayectorias de desarrollo sostenible:

- a) Debemos prestar especial atención al estudio de la Biodiversidad, no sólo porque los recursos naturales de otro tipo han sido ya considerados en el análisis económico de manera (más o menos, según sea el caso) plausible, sino porque existe un cierto consenso respecto de la importancia real del papel estratégico que desempeña como recurso de naturaleza muy singular.
- b) Es especialmente prioritario el diseño de políticas económicas que se ocupen específicamente de ofrecer mecanismos de mantenimiento de esos recursos dentro de patrones de uso sostenibles.

Se hace inevitable, pues, preguntarnos si estamos haciendo un análisis correcto de los problemas propios de la biodiversidad y si –además– estamos aplicando un conjunto de conceptos suficientemente elaborados que den fundamento a la construcción de instrumentos y políticas adecuados.

1.2. Justificación Y Objetivos

Desde un punto de vista estrictamente académico, la razón de ser de un trabajo de tesis doctoral es la exploración sistemática de algún aspecto novedoso, insuficientemente analizado o poco conocido, en el contexto de una problemática particular, de interés científico. En nuestro caso, aspiramos a argumentar de manera razonable la utilidad que puede derivarse del estudio de un tema que merece mayor atención: la capacidad que posee el capital natural para ofrecer tecnologías útiles en el proceso de innovación. El enfoque que ofrecemos se basa en la adopción de conceptos provenientes de teorías diversas (Economía Ecológica, Economía Neoclásica, economía Evolutiva) y en la aplicación de modelos de optimización y de dinámica No Lineal.

Simultáneamente, la motivación subyacente al trabajo que aquí presentamos es la de incrementar nuestro conocimiento sobre las posibles soluciones –esto es, las políticas- adecuadas frente a un conjunto dado de problemas. Al respecto, esperamos ofrecer elementos útiles para la discusión en torno a los instrumentos necesarios para abordar las soluciones de política económica relacionadas con los recursos propios de la biodiversidad.

Puede decirse que la economía como disciplina tiene algunas limitaciones para abordar el análisis de los problemas relacionados con la biodiversidad (al respecto ver, por ejemplo Perrings Charles; Mäler, Karl; Folke, Karl; Holling, CS y Bengt-Owe, Jansson (1995a - 1985b), quienes señalan adelantos, pero también áreas de trabajo oscuras o pendientes de desarrollo sólido). Igualmente intentaremos mostrar las razones por las cuales diversos modelos de análisis del Desarrollo Sostenible exhiben dificultades para asumir un hecho que puede ser considerado de importancia: la naturaleza posee cierta capacidad para producir innovaciones tecnológicas que son aprovechados por el sistema económico.

Mostraremos que existe evidencia que ilustra la capacidad innovadora del Capital Natural, la cual ha sido sólo parcialmente reconocida, especialmente en los modelos de Desarrollo Sostenible.

En este trabajo sostendremos, pues, que existe un hecho económico fundamental que no ha sido lo suficientemente analizado por buena parte de los modelos y teorías del Desarrollo Sostenible: el capital natural es un importante contribuyente en el proceso de innovación. El capital natural es una valiosa (y en muchos casos, imprescindible) fuente de información, aprendizaje y conocimiento tecnológico susceptible de ser aprovechada por

el sistema económico, y ese hecho está relacionado con la existencia de la biodiversidad, la cual debe considerarse un recurso escaso.

Partiendo de una revisión de la visión tradicional acerca de la relación entre los inventos humanos y la naturaleza, intentaremos mostrar la importancia que puede tener, para comprender algunos aspectos del proceso de Innovación, la diferenciación entre las tecnologías naturales y las tecnologías humanas. Finalmente, plantearemos algunas de las implicaciones que la consolidación de estos conceptos conlleva para hacer planteamientos de política Económica.

La naturaleza - el capital natural- sería, pues, una especie de “primer inventor” o “primer innovador”, un agente innovador que participa, junto a otros (agentes, empresas, instituciones) de la creación de soluciones tecnológicas.

Algunas de las implicaciones relacionadas con el reconocimiento de este papel desempeñado por el capital natural en el proceso de innovación son:

- La construcción de teorías, el diseño de modelos del proceso de Desarrollo Sostenible y -por tanto- las políticas económicas propuestas a partir de estos elementos; dependen sensiblemente de la definición que se haga del “Capital Natural”.
- Deberíamos modificar nuestra percepción (y nuestra modelación) de las características esenciales de los ecosistemas naturales y su interacción con la economía humana, puesto que deben considerarse también como agentes susceptibles de generar innovaciones.
- En general, puede decirse que se soslayan algunas propiedades básicas del capital natural si solo lo vemos como colección de inputs o como sostén de funciones ambientales: el capital natural es una fuente de progreso tecnológico. En consecuencia, es muy probable que estemos subestimando las pérdidas económicas derivadas de la destrucción de los sistemas naturales terrestres.
- La consideración de los ecosistemas como agente de innovación, podría hacer evidente “magnitudes” económicas ocultas: las ganancias tecnológicas que conlleva la interacción del hombre con su entorno natural, las pérdidas tecnológicas que implica la destrucción de la diversidad natural. Además revela problemas de especificación en los modelos de Desarrollo Sostenible que intentan describir y analizar el curso probable de la economía sin la inclusión de éstas “ganancias” y

“pérdidas” (lo que puede conducir, claro está, a predicciones excesivamente pesimistas u optimistas).

- Desde el punto de vista de la política económica, preguntas de la mayor relevancia aparecen: ¿debe darse una “recompensa” a este agente innovador? ¿que formas debe adoptar este “pago”? ¿De que formas debemos incentivar esta peculiar forma de innovación?

Un elemento fundamental para el establecimiento de estas implicaciones, es la verificación de la relación económica entre los artefactos existentes en la naturaleza y los humanos, la cual es compleja, pues en principio puede ser de inspiración, copia, o emulación tecnológica. Al respecto, expondremos evidencia relacionada con el aprovechamiento técnico (y vale la pena añadir, económico) de los logros evolutivos realizados por otras especies.

En síntesis, nuestra propuesta consiste en que es posible clasificar y definir las relaciones entre las tecnologías humanas y naturales a partir de los conceptos de bioinspiración, biomimética y bioutilización, los cuales en su conjunto, permiten el análisis de evidencia sobre de la existencia de flujos de conocimientos que son permanentemente intercambiados por el ecosistema global y el sub - sistema económico, y que son aprovechados en el sistema de innovación a partir de procesos de aprendizaje.

A partir de el análisis de treinta ejemplos o casos en los que las tecnologías humanas están basadas en procesos de aprendizaje desde el capital natural, dedicaremos nuestra atención al desarrollo de algunos conceptos (Agentes Económicos Naturales, Procesos Naturales de Innovación, Tecnologías Naturales, Aprendizaje del Capital Natural, Naturfactos, entre otros) relacionados con una comprensión más amplia de las implicaciones que tiene la comprensión del papel desempeñado por la biodiversidad en los procesos de Desarrollo Sostenible.

En particular, trataremos de exponer los orígenes teóricos de éstos conceptos, relacionándolos con avances propios de áreas como la Economía Ecológica, la Economía Evolutiva y la propia Economía Neo Clásica. Encontramos que la Sostenibilidad, en principio, debería incluir como uno de los objetivos de política económica ambiental, la preservación de las capacidades de invención e innovación inherentes al capital natural. En consecuencia, vale la pena preguntarse qué tipo de políticas específicas son recomendables una vez se reconoce este objetivo.

Puesto que los naturfactos provienen de agentes económicos naturales son una prueba de la existencia de conocimiento acumulado en el capital natural, el cual es aprehendido a través de procesos de aprendizaje por los agentes económicos humanos, surge otro interrogante: ¿Cuál es el sistema adecuado de compensación?

Es muy probable que existan diversas consecuencias contables relacionadas con la consideración explícita del papel del capital natural en la generación de invenciones e innovaciones: cuando se habla de conocimientos y se cuantifica su impacto, no se distingue la parte proveniente del capital natural. El hecho de asumir que el capital natural es una fuente de innovación tecnológica implica, en principio que debemos reconocer que éste es más que un agregado de recursos naturales que sirven como fuente de inputs y receptáculo de desechos (visión compartida y aceptada por buena parte de los modelos de desarrollo sostenible. Creemos que es necesaria la ampliación del concepto de capital natural, de tal forma que no sea reducido a su papel restrictivo -como límite ecológico- en el proceso de desarrollo económico, o como un activo que, esencialmente se degrada en el tiempo.

Justificación: Es necesario el desarrollo de un análisis coherente de aquellos instrumentos y aquellas medidas de Política Económica que permitan tomar en cuenta el aporte tecnológico que el capital natural hace al proceso económico, para que los recursos de la biodiversidad, en términos de la provisión de tecnologías y procesos de aprendizaje sean manejados de manera sostenible.

Objetivos: El objetivo principal de la tesis, por tanto, es el diseño de una propuesta de Política Económica, que hace especial énfasis en el caso particular de la Biodiversidad, vista como una fuente de avance tecnológico.

Sobre la base provista por la evidencia empírica y algunos desarrollos teóricos, nos proponemos la construcción de una propuesta que conduzca a la presentación de instrumentos eficaces, que de alguna manera cumplan con aquellas características deseables para la toma de decisiones en Política Económica (al respecto, puede consultarse Fernández Díaz et al. 1999).

Nuestra manera particular de afrontar el análisis de los problemas propios de la sostenibilidad, está inspirada en el trabajo realizado por teóricos como Kenneth Goulding y Nicholas Georgescu – Roegen (quienes hicieron énfasis en la importancia que tienen la modelización y la caracterización correctas de la interacción Economía - Medio ambiente); Richard Goodwin (especialmente su estudio de las complementariedades existentes entre

teorías económicas diversas, empleando la modelización no lineal de los procesos económicos), Joseph Alois Schumpeter (su énfasis en la comprensión de los procesos de innovación tecnológica) y algunos teóricos que han desarrollado análisis pioneros en el tratamiento de la Biodiversidad (Martín Weitzman, Kenneth Arrow, Charles Perrings, Timothy Swanson).

Nuestro objetivo es presentar algunos elementos útiles para la construcción de un “análisis” y una “respuesta” particulares, que puedan ser de utilidad para ampliar el espectro de herramientas con las que contamos los economistas para estudiar algunos de los problemas que han sido mencionados.

Contenido De La Tesis

Respecto del contenido de la Tesis, dedicamos la primera parte (capítulos dos al cinco) a una exposición sintética (y a una revisión crítica) de la forma en que los modelos de “crecimiento económico” incorporan los problemas ambientales, haciendo especial énfasis en el tratamiento dado al concepto de capital natural, al igual que a las principales medidas de política económica medio ambiental asociadas a cada una de éstas propuestas teóricas (agrupadas como políticas de sostenibilidad fuerte y débil).

Si nuestra conjetura es correcta, los modelos Neo Clásicos de desarrollo sostenible (propios de la Economía Ambiental) han fortalecido notablemente su poder explicativo, especialmente con la incorporación explícita de restricciones ambientales⁵; a la vez que se caracterizan por su reducida capacidad de analizar –en el sentido estricto del término– el desarrollo sostenible, entendido como un proceso económico cualitativamente distinto del de crecimiento económico, con lo que algunas implicaciones importantes desde el punto de vista de la innovación tecnológica son dejados al margen⁶.

En cuanto a los modelos de Economía Ecológica –en especial el modelo de “Estado Estacionario”– nuestro estudio sugiere que éstos poseen gran fortaleza en términos de la especificación correcta de las restricciones ambientales a las que está sometida la actividad económica, pero cuentan con una debilidad básica: su análisis de los procesos de Innovación Tecnológica es “indirecto” o, cuando menos, poco explícito si lo comparamos con el ofrecido por otros modelos rivales.

⁵ A partir del reconocimiento del doble papel desempeñado por el Medio Natural como fuente de insumos y como sumidero de desechos.

⁶ Esta distinción es un rasgo fundamental de la propuesta de teóricos como Joseph Alois Schumpeter, Nicholas Georgescu - Roegen y Herman Daly.

Finalmente, los modelos evolutivos presentan un desarrollo equilibrado, en el sentido de que han logrado adaptar las restricciones ambientales en la descripción del proceso de crecimiento y desarrollo económico, en tanto que, exploran –igualmente- la modelación explícita de procesos de innovación (incremental y radical).

Específicamente, el capítulo 1 y se denomina “Introducción, problemas y preguntas iniciales” y en él se plantean el conjunto de problemas e interrogantes que definen la indagación acerca de las políticas económicas relacionadas con el desarrollo sostenible, en particular con las tecnologías provenientes del capital natural y con los procesos de aprendizaje desde el capital natural.

En el capítulo 2, titulado “Los indicadores macroeconómicos de desarrollo sostenible y la evaluación empírica de la sostenibilidad”, está dedicado a la revisión y evaluación de los índices macroeconómicos de contabilidad económico – ambiental, desarrollados en el contexto de la Economía Ambiental y la Economía Ecológica, dada su pertinencia en la determinación de criterios que permiten la evaluación de la sostenibilidad respecto de un objetivo económico dado.

El capítulo 3, llamado “Una revisión crítica de los modelos de desarrollo sostenible (i): modelos neoclásicos”, se evalúan modelos Neo Clásicos de desarrollo sostenible (propios de la Economía Ambiental) y se muestra que éstos han fortalecido notablemente su poder explicativo, especialmente con la incorporación explícita de restricciones ambientales; a la vez que se caracterizan por su reducida capacidad de analizar –en el sentido estricto del término- el desarrollo sostenible, entendido como un proceso económico cualitativamente distinto del de crecimiento económico, con lo que algunas implicaciones importantes desde el punto de vista de la innovación tecnológica son dejados al margen.

El capítulo 4, denominado “Una revisión crítica de los modelos de desarrollo sostenible (ii): modelos de economía ecológica”, destaca aproximaciones como la del modelo de “Estado Estacionario”- las cuales poseen gran fortaleza en términos de la especificación correcta de las restricciones ambientales a las que está sometida la actividad económica, pero cuentan con una debilidad básica: su análisis de los procesos de Innovación Tecnológica es “indirecto” o, cuando menos, poco explícito si lo comparamos con el ofrecido por otros modelos rivales.

El capítulo 5 lleva por título “Una revisión crítica de los modelos de desarrollo sostenible (iii): modelos de economía evolutiva” y señala que los modelos evolutivos han logrado adaptar las restricciones ambientales en la descripción del proceso de crecimiento y

desarrollo económico, en tanto que, exploran –igualmente- la modelación explícita de procesos de innovación (incremental y radical).

Nuestra conclusión general, en la primera parte de la tesis es doble. De una parte, encontramos que una vez evaluadas estas grandes líneas de análisis del desarrollo sostenible, puede constatarse un notable avance en la capacidad explicativa que la disciplina económica puede ofrecer acerca de la sostenibilidad, puesto que, sin excepción, las diferentes variantes teóricas examinadas han incluido en sus modelos variables ambientales representativas y relevantes.

De otra parte, en cuanto concentramos nuestra mirada en aspectos específicos tales como el papel desempeñado por el capital natural, encontramos algunas limitaciones; en particular, puede constatarse un interés notable por el análisis de los efectos de la tecnología sobre el medio ambiente, pero escaso interés por el estudio de los posibles efectos que tiene la interacción entre los ecosistemas y el sistema económico en el proceso de innovación. La constatación de esta especie de asimetría analítica motiva, en buena medida, el desarrollo de la segunda parte de éste trabajo de Tesis Doctoral.

La segunda parte de la tesis –correspondiente a los capítulos seis a diez- es, en buena medida, un ejercicio de análisis del flujo de cambio tecnológico proveniente del capital natural. Es también la presentación de una propuesta de política económica orientada hacia la creación de esquemas de incentivos económicos que permitan la protección efectiva de la capacidad de innovación que posee el capital natural.

En el capítulo 6, denominado “El aprendizaje del capital natural: antecedentes y desarrollos teóricos” se plantea la relación existente entre el capital natural y el proceso de innovación económica; partiendo de la existencia de los “Naturfactos” (bienes económicos originados en tecnologías naturales, las cuales sirven de antecesor evolutivo, de referente, para el desarrollo de bienes, servicios y tecnologías humanas) y sus posibilidades de aprovechamiento en el sistema económico, se plantean diversas modalidades en las que tecnologías, bienes y servicios usan la naturaleza como fuente de inspiración, como referente para el diseño, o como insumo tecnológico.

Este fenómeno se denomina –en general- “biomimética” e incluye diversas denominaciones relacionadas (“bioinspiración”, “biomimesis”, “biónica”, entre otras). Finalmente, en este capítulo se caracteriza el proceso de “Aprendizaje del Capital Natural”, el cual se refiere a la interacción entre tecnologías provenientes de la naturaleza y las tecnologías desarrolladas por los humanos. Se presenta un análisis de treinta

ejemplos de tecnologías humanas basadas en tecnologías naturales, correspondientes a procesos de bioinspiración, biomimética y bioutilización, para lo cual se aplica un diagrama de Venn que permite una clasificación de los naturfactos que hace posible una valoración de la importancia del aporte de la naturaleza en los desarrollos tecnológicos humanos. A manera de síntesis, puede decirse que el análisis de las trayectorias de las tecnologías presentadas indica que existen tres tipos de aprendizaje (bioinspiración, biomimética y bioutilización) desde la naturaleza que caracterizan el proceso de transferencia de conocimiento tecnológico desde los ecosistemas naturales hacia el sistema económico humano y que estos tres tipos de aprendizaje con frecuencia se presentan de manera simultánea (se superponen) en el desarrollo de tecnologías, productos, y/o servicios.

En el capítulo 7, titulado “El aprendizaje del capital natural a través de la Bioinspiración”, se expone la modalidad de transferencia de conocimientos desde la naturaleza conocida como bioinspiración, en la cual la información obtenida desde el entorno natural o la comprensión de algún aspecto fundamental de alguna actividad biológica permiten a los seres humanos la creación de productos innovadores. La bioinspiración constituye la primera de las formas de conocimiento desde el capital natural que abordaremos en extenso a través del análisis de productos desarrollados por los humanos, derivados del aprovechamiento de las soluciones tecnológicas observadas en la naturaleza. Se detallan casos en los que las aves, los tiburones, los moluscos, las ballenas, los remolinos (entre otros) sirvieron como referentes biológicos relevantes para la consolidación de tecnologías humanas. Se ilustran las maneras a través de las cuales la bioinspiración se constituye como una estrategia de creación, de diseño de productos fabricados por los humanos a través de la adaptación de funciones y mecanismos presentes en la naturaleza que resulta útil para resolver problemas tecnológicos concretos, en la cual emplea como recurso creativo fundamental la analogía.

El capítulo 8 se titula “El aprendizaje del capital natural a partir de la biomimética” y propone que la biomimética puede ser entendida como una segunda forma específica de aprendizaje desde el capital natural a partir de la cual se consigue la transferencia efectiva de conocimiento presente en la naturaleza. A diferencia de la bioinspiración (el aprovechamiento del referente natural como analogía creativa) o la bioutilización (incorporación funcional de una tecnología natural), la biomimética está orientada a la aplicación de una especie de “ingeniería inversa” que parte del conocimiento detallado del referente o los referentes naturales y consigue replicar la forma, la función, la estructura, los materiales, mecanismos y/o procesos naturales, configurando –entonces- un proceso relevante de aprendizaje desde la naturaleza. A partir del análisis detallado de

diez tecnologías biomiméticas, que representan innovaciones en campos tan diversos como la construcción, la arquitectura y el diseño, el transporte, la refrigeración, o la preservación de muestras biológicas, medicamentos y vacunas, entre otros, se explora esta segunda modalidad de aprendizaje desde el capital natural.

El capítulo 9, titulado “La Bioutilización: una forma de aprendizaje desde el capital natural basado en la incorporación de procesos y componentes naturales”, presenta un análisis de diversos procesos de uso de un componente natural con el propósito de integrarlo de manera funcional en una tecnología, bien o servicio desarrollado por los humanos. Dicho componente natural puede consistir en una molécula (Acuaporin), una sustancia (Estatinas, Taxol, Byetta y, Medicamentos biomarinos), un organismo o población (Mushroom, Biodome), o una función ecosistémica (Polinización y Control biológico de plagas), entre otros. Igualmente, el proceso de integración de los diversos componentes naturales puede ocurrir a diferentes escalas (nivel molecular, nivel celular, a nivel del organismo o a nivel de los ecosistemas, por ejemplo). El proceso de Bioutilización constituye una tercera modalidad de aprendizaje desde el capital natural que, está compuesta por diversas estrategias de aprovechamiento.

El capítulo 10, llamado “Política Económica E Instrumentos Para La Sostenibilidad De Los Sistemas Híbridos De Innovación: Un Análisis De Dinámica No Lineal”, propone, en primer lugar, un modelo del tipo input – output dinámico, en el cual se relacionan el crecimiento económico y los procesos de aprendizaje desde el capital natural. En segundo lugar, presenta una aplicación de la teoría de catástrofes de René Thom como herramienta de análisis dinámico. Se exponen las catástrofes elementales de Thom, utilizando el programa Mathematica 8.0, especialmente la catástrofe de cúspide, que sirve de base para el análisis del sistema híbrido de innovación. El modelo propuesto asume una estructura básica del proceso de producción con una función de costes cúbica. El modelo plantea una combinación de precios de mercado (para el productor humano) y precios naturales (para el productor natural), en un contexto en el que el productor humano aprovecha las tecnologías naturales sin reconocer –en principio- una retribución o compensación al productor natural, por lo que una parte del mercado permanece a la sombra y nada garantiza que la dinámica sea suficiente para evitar una situación de deterioro ambiental irreversible, por lo que debe garantizarse, de parte de un agente o agencia externa, una retribución óptima para el agente natural. Se concluye que la política económica es necesaria para garantizar la provisión de bienes y servicios desde el sistema de producción natural. La estructura de dicha política económica debería implicar una adecuada dinámica de incentivos basada en compensación económica a los agentes naturales.

En el capítulo 11, denominado “Hacia el diseño de un sistema de incentivos para la sostenibilidad de los sistemas híbridos de innovación” se considera el conjunto de instrumentos específicos que podrían ser aplicados en la gestión de los sistemas híbridos de innovación. Se plantea el interrogante de si deben existir instituciones de protección a los derechos de propiedad para preservar la capacidad innovadora proveniente de los agentes económicos naturales. Se plantea que este tipo específico de innovación requiere de la aplicación de esquemas de protección y compensación al agente innovador, a fin de contar con un marco de incentivos que garantice la continuidad en el proceso de producción e innovación.

Conclusiones

En términos de las conclusiones, el capital natural, puede considerarse como una fuente primaria de innovaciones, a manera de “primer inventor” o “primer innovador” que participa en el proceso de búsqueda de soluciones tecnológicas. La sostenibilidad, en principio, debería incluir como uno de los objetivos de política económica ambiental, la preservación de las capacidades de invención e innovación inherentes al capital natural. Pueden identificarse tres modalidades de aprendizaje desde el capital natural, denominadas bioinspiración, biomimética y bioutilización, las cuales pueden clasificarse a través de un análisis a partir del Diagrama de Venn, el cual hace posible comprender la ocurrencia de procesos de diferenciación, separación y superposición de los tipos de aprendizaje desde el capital natural. El análisis de las trayectorias de las treinta tecnologías presentadas, indica que los tipos de aprendizaje aparecen en secuencias que no guardan siempre el mismo orden y que las aproximaciones biomiméticas constituyen un subconjunto de la bioinspiración, en el sentido que toda emulación de la naturaleza se produce porque se observan ciertas características naturales deseables para el desarrollo de la tecnología humana.

Los conceptos de “naturfacto” (tecnología natural), “tecnologías basadas en la naturaleza” y “aprendizaje del capital natural”, son susceptibles de modelización a partir de modelos dinámicos (input-output, catástrofe de cúspide) que muestran la naturaleza no lineal y compleja del sistema híbrido de innovación (natural-humano) y la necesidad de la aplicación de políticas económicas que permitan mantener la capacidad de innovación de los ecosistemas naturales.

Desde el punto de vista de la política económica, es necesario hacer un reconocimiento del derecho de propiedad intelectual que tiene el agente natural sobre la tecnología

natural que ha desarrollado; dado que el agente natural participa en el proceso de interacción económica como agente “pasivo”, una manera práctica para hacer efectivo este derecho puede ser la cesión de la gestión a algún agente económico o agente social que pueda tener la capacidad legal de representarlo. Desde un punto de vista de la implementación de la política, una vez se han revisado los sistemas de protección de la biodiversidad efectivamente aplicados en diferentes regiones y países, el esquema más razonable podría ser la conformación de un sistema de gestión “mixto” que permita contar con la participación de agentes públicos y privados que representen a cada uno de los niveles de uso y explotación de los recursos (agentes naturales, poblaciones locales, agricultores, criadores de plantas, pescadores, científicos e institutos de investigación públicos, universidades públicas y privadas, laboratorios de investigación y desarrollo pertenecientes a empresas privadas, gobiernos locales y nacionales); con lo que se configura un contexto en el que deben aplicarse esquemas de propiedad intelectual de carácter multilateral que pueda utilizar mecanismos tales como los acuerdos y tratados internacionales.

CAPÍTULO II

Los Indicadores Macroeconómicos De Desarrollo Sostenible Y La Evaluación Empírica De La Sostenibilidad

2. Los Indicadores Macroeconómicos De Desarrollo Sostenible Y La Evaluación Empírica De La Sostenibilidad

La evaluación empírica de la sostenibilidad puede ofrecer argumentos de interés en la búsqueda de la relación existente entre la actividad económica, el crecimiento económico, y la degradación ambiental. Es por ello que se hace necesario un análisis de la evidencia que puedan ofrecer indicadores susceptibles de ser considerados como relevantes. Esa es la razón por la que dedicamos este capítulo a la exposición y análisis de los índices macroeconómicos de contabilidad económico – ambiental, desarrollados en el contexto de la Economía Ambiental y la Economía Ecológica, respectivamente. Nuestro punto de partida para la revisión de este tipo de evidencia empírica, desde un punto de vista estrictamente económico, es la utilización de indicadores que tienen como característica analítica común la adopción del concepto de Ingreso Sostenible; sin embargo, es posible hacer una diferenciación clara entre ellos si consideramos que existen los llamados índices de sostenibilidad débil y sostenibilidad fuerte.

Estas dos variantes de la sostenibilidad, que son interpretaciones opuestas del desarrollo sostenible, deben entenderse como dos maneras de evaluar la trayectoria de crecimiento económico de una economía específica, que emplean criterios que nos permiten la evaluación de la sostenibilidad respecto de un objetivo económico deseado: en general, existe un consenso básico acerca de la preservación del bienestar económico entendido en su acepción más amplia, es decir, aquella que incluye tanto los activos como los problemas ambientales.

Del Ingreso Nacional Al Ingreso Sostenible: Algunos Fundamentos Teóricos De Los Indicadores De Sostenibilidad Débil Y Fuerte

Los indicadores macroeconómicos de sostenibilidad en Economía Ambiental tienen como raíz común la noción de Producto Nacional Neto (PNN), entendido como una manera apropiada de medir el bienestar económico, en vez de la tradicional medición del Producto Nacional Bruto (PNB), el cual constituye -de hecho- una sobre - estimación del bienestar económico nacional (puesto que excluye el desgaste y pérdida de recursos naturales, entre otros elementos importantes).

Autores del prestigio de Partha Dasgupta y Karl-Goran Mäler han insistido en sustentar que la mejor medida del bienestar económico, cuando la base de recursos ambientales afecta directamente al bienestar económico, es el producto nacional neto (PNN) real, puesto que éste tiene en cuenta el efecto marginal de las existencias de capital, el flujo de consumo y la variación en la base de recursos naturales (Dasgupta y Mäler 1991).

Un conjunto de indicadores propios de la Economía Ambiental (Es decir, medidas de la llamada Sostenibilidad Débil, en la que se suponen altas posibilidades de sustitución entre el capital natural y el capital hecho por el hombre) se ha desarrollado a partir de ésta noción de PNN, suponiendo que la sostenibilidad puede medirse en términos de acumulación neta de capital y que el activo de capital agregado de la economía está compuesto, a su vez, por activos de capital físico y capital natural.

En este contexto de sostenibilidad débil, la pregunta de si una economía es sostenible o no, puede ser respondida con una medición apropiada del ingreso, el capital o bien el ahorro neto de una economía específica.

Por su parte, los indicadores de sostenibilidad fuerte, tienen como guía esencial una de las ideas capitales en la llamada “Economía Ecológica”: la necesaria inter - relación entre los sistemas económico y natural, en la que éste último desempeña diversas funciones tales como servir de sumidero, proveer insumos, entre otras. Desde el punto de vista analítico, los diversos autores agrupados en la denominada “Economía Ecológica” (por ejemplo Herman Daly, Charles Perrings o Robert Costanza) asocian la sostenibilidad - y por tanto, las medidas o indicadores de sostenibilidad- con los elementos o componentes bio - físicos del entorno natural que son imprescindibles para el funcionamiento del sistema económico.

A continuación se describen de manera esquemática, las acepciones esenciales que pueden adoptar tanto las nociones de ingreso sostenible, como los propios criterios de sostenibilidad, pues ambos están en la base de las estimaciones, cálculos y aproximaciones cuantitativas al desarrollo sostenible que revisamos en este documento.

Partiendo de algunas definiciones o agregados, podemos entender la manera en que se ha transformado la noción genérica de ingreso nacional hasta convertirse en indicadores de sostenibilidad:

PNN: Producto Nacional neto

C: Consumo Agregado

K: Stock de Capital Total

k: Stock de Capital Reproducible

N: Stock de Recursos Naturales

A: Cambio Técnico Exógeno

2.1. Ingreso Sostenible De Hicks

Como punto de partida, tomaremos el concepto de ingreso nacional de Hicks:

“El ingreso de una persona (o naciones) es la cantidad que él /ella (o la nación) puede consumir durante un período especificado mientras garantiza que su riqueza al final del período no es menor que su riqueza al principio” (Hicks 1946)

Esta acepción del concepto de ingreso sostenible es, quizá la más general, puesto que se refiere al mantenimiento de la riqueza nacional en el tiempo, teniendo en cuenta las necesidades de consumo. Tradicionalmente, hasta la aparición del concepto de ingreso sostenible “verde”, se asumía que la dotación de capital de la economía estaba –en general- representado por el capital físico.

$$PNN_1 = C + K \text{ HICKS}$$

2.2. Ingreso Sostenible De Weitzman – Solow - Hartwick

La versión del ingreso nacional se convierte en ingreso nacional “verde” con los trabajos de Weitzman, que permitieron la ampliación del concepto general de Hicks para incluir recursos naturales, es decir, especificando los componentes del capital total de tal manera que los activos representados por los recursos naturales fuesen explícitamente reconocidos, además de proponer el concepto de equivalente estacionario del consumo futuro como la clave para el estudio de la evolución temporal del ingreso:

“La búsqueda rigurosa de un concepto significativo de bienestar conduce a un rechazo de todos los conceptos de ingreso actuales y termina con algo más cercano a un "magnitud de riqueza" tal como el valor presente descontado del consumo futuro”. (Weitzman 1976:156).

Y con ello se expresa la sostenibilidad en términos de consumo y bienestar.

De otra parte, Mäler (1991) y Dasgupta (1996) han sugerido que debe tomarse al PNN verde como una medida de los cambios en el bienestar resultantes de pequeños cambios de política económica.

Esta versión del ingreso sostenible fue perfeccionada hasta convertirse en la versión estándar de la Economía Ambiental; basada en el modelo de crecimiento económico de Solow y asociada a los trabajos del propio Solow y de Hartwick, quien formaliza el ingreso

Hicksiano de tal manera que el PNN sea la cantidad de ingreso que puede ser consumida permitiendo que el valor del capital permanezca intacto.

$$PNN_2 = C + (k + N) \text{ WEITZMAN – SOLOW - HARTWICK}$$

Puesto que el *PNN* puede ser interpretado como medida de bienestar, o más bien, como una aproximación ordinal del bienestar. Una de las implicaciones importantes de esta línea de investigación es que la elección de las variables a incluir en el *PNN* se derivan de la función de bienestar económico.

2.3. Ingreso Sostenible De Fisher – Nordhaus - Hartwick

El profesor William Nordhaus ha desarrollado una medida del ingreso nacional sostenible que refleja de manera más completa el desempeño económico, basada en el concepto de ingreso de Irving Fisher; esto es, asumiendo que el ingreso es el máximo consumo real constante que pueda generarse por la riqueza total -compuesta por *K*, *N* y *A*- teniendo en cuenta las ganancias actuales y futuras.

La principal implicación de asumir la versión Fisheriana es que el capital total debe ser valorado incluyendo las ganancias en eficiencia debidas al cambio técnico, de la cual deduce que es indispensable tener en cuenta el cambio técnico si se quiere tener una medición correcta del desarrollo sostenible.

De otra parte, existe una convergencia con la noción de ingreso Hicksiana, si ésta se amplía para incluir el cambio técnico; de hecho, Hartwick y Long (1995) han mostrado como funciona el modelo De Hicks-Solow cuando se tiene en cuenta el efecto positivo del cambio técnico. Vale la pena anotar que, a pesar de que ambas aproximaciones son idénticas, desde el punto de vista operativo sus estimaciones difieren (de hecho, es esperable que el Ingreso de Fisher sea mayor que el Hicksiano Ampliado).

$$PNN_3 = C + (k + N) + A \text{ FISHER - NORDHAUS – HARTWICK}$$

2.4. Ingreso Sostenible De Daly – Cobb

Partiendo del ingreso Hicksiano genérico –el que hemos denominado como PNN1- ha sido desarrollado el ISEW de Herman Daly y John Cobb (1993). La principal diferencia, desde el punto de vista puramente teórico- entre este indicador de sostenibilidad fuerte y los índices Neoclásicos o de Economía Ambiental es su peculiar manera de hacer deducciones

al bienestar económico a través del concepto de “gastos defensivos”, de tal manera que al PNN base, se le restan, además del desgaste propio de los recursos naturales, los impactos indeseables de las actividades de consumo y producción, y algunos impactos sociales negativos atribuibles al propio proceso de crecimiento económico.

$$PNN_4 = C + (k + N) - D \text{ DALY} - \text{COBB}$$

Los Criterios De Sostenibilidad

A continuación, describiremos las reglas económicas de sostenibilidad, es decir, el conjunto de criterios que nos permiten definir si una economía es sostenible o no, para cada tipo de modelo (de sostenibilidad fuerte o débil).

Para empezar, es importante entender que la definición del término “Desarrollo Sostenible, es general, amplia e imprecisa. Se refiere -en general- al análisis de la viabilidad de los procesos de crecimiento y desarrollo económico a largo plazo, en el sentido de que debe tenerse en cuenta que éstos no deben sobrepasar las posibles restricciones derivadas de su interacción con los recursos que ofrece el medio ambiente natural.

Es necesario, entonces, dar significado preciso a la noción de sostenibilidad a través de reglas precisas; y eso –precisamente- son los criterios de sostenibilidad, los cuales generalmente adoptan la forma de restricciones –desde el punto de vista estrictamente matemático- es decir; se trata de “Desigualdades” más que de criterios de maximización propiamente dichos. La siguiente tabla 2 puede resultarnos de utilidad para ilustrar las diferencias ya mencionadas.

Tabla 2. Índices macroeconómicos de sostenibilidad

ÍNDICES MACROECONÓMICOS DE SOSTENIBILIDAD		
SOSTENIBILIDAD DÉBIL (BASADOS EN EL INGRESO AGREGADO)		
INGRESO SOSTENIBLE	CRITERIO DE SOSTENIBILIDAD	ÍNDICE ESTIMADO
$PNN_1 = C + K$ Hicks	$\frac{dK}{dt} = 0$	
$PNN_2 = C + (k + N)$ Weitzman-Solow-Hartwick	$\frac{d(k + N)}{dt} \geq 0$ Siendo: $K = (k + n)$	MEW (Nordhaus – Tobin) PIN (Repetto) ANC (Bartelmus) WSI Pearce-Atkinson Ahorro Genuino (Hamilton)
$PNN_3 = C + (k + N) + A$ Nordhaus – Hartwick	$\frac{d(K + A)}{dt} \geq 0$	FNI (Nordhaus)
SOSTENIBILIDAD FUERTE (BASADOS EN EL INGRESO AGREGADO)		
$PNN_4 = C + (k + N) - D$ Daly – Cobb	$\frac{dN}{dt} \geq 0$	ISEW (Daly – Cobb) GPI (Cobb et al)
SOSTENIBILIDAD FUERTE (NO BASADOS EN EL INGRESO AGREGADO)		
	$\frac{dN}{dt} \geq 0$	Huella Ecológica (Wackernagel) Intensidad de Materiales

Fuente: Elaboración del autor

Estimaciones Y Resultados Empíricos

2.5. Mediciones De Sostenibilidad Débil

En términos generales, desde el punto de vista de su estimación, el PNN es la medición de la producción en una economía una vez se han deducido las depreciaciones correspondientes al desgaste y utilización de los activos que se consideran como componentes de la riqueza agregada (Capital Físico y Capital Natural, por ejemplo). Las estimaciones que presentamos aquí son, pues, variantes de alguna de las variantes teóricas mencionadas en el apartado anterior.

Robert Repetto, uno de los pioneros en el cálculo del PIN, encontró que la contabilidad económica sostenible puede diferir notablemente de la contabilidad tradicional:

“Está claro que el PIB calculado convencionalmente sobrestima sustancialmente el crecimiento del ingreso neto, después de justificar el consumo del capital de recursos naturales. De hecho, mientras el PIB aumentó a una tasa promedio anual de 7,1% entre 1970 y 1984, nuestra estimación del Producto Interno “Neto” solamente se incrementó en 4,0% por año. En otras palabras, casi la mitad del crecimiento registrado fue generado no por un aumento sustentable de la productividad sino por la disminución del activo de recursos naturales” (Repetto 1991:121).

A partir del reconocimiento de la validez general de las estimaciones basadas en el *PNN* (o el PIN, el producto interior neto), pueden realizarse los cálculos que reseñamos a continuación.

2.5.1. Índice De Sostenibilidad Débil (Pearce-Atkinson)

El índice de Sostenibilidad débil (Pearce y Atkinson 1993) nos permite evaluar el desempeño de una muestra de 18 economías representativas, en las que pueden encontrarse países de alto, mediano y bajo ingreso. Puede definirse de la siguiente manera:

Índice Sostenibilidad Débil (ISD)= Ahorro - (Depreciación Capital Hecho por el Hombre + Depreciación Capital Natural).

Con lo que tenemos que, sí:

$ISD > 0$ La Economía es Sostenible

$ISD = 0$ La Economía es Apenas Sostenible

$ISD < 0$ La Economía es Insostenible

Partiendo del reconocimiento de la divergencia sustancial entre el ahorro neto y el ahorro bruto en la totalidad de las economías (es decir, de la sobrestimación del bienestar económico), en términos generales, la imagen de los patrones de sostenibilidad que resulta de éste índice es de una clara asimetría, puesto que los países desarrollados o de ingresos altos (Japón, Estados Unidos, Alemania, Holanda) son sostenibles, en tanto que los países de Ingresos medios y bajos tienden a ser insostenibles (las economías insostenibles pertenecen en buena medida al África Sub - Sahariana y Asia). Una excepción, que no rompe con la tendencia general, es la economía de Costa Rica.

Esto puede explicarse como un resultado positivo de aquellos países capaces de exhibir altas tasas de ahorro, a la vez que deprecian relativamente poco su propio capital natural. De manera simétrica, los países menos desarrollados muestran insostenibilidad por una combinación de alta degradación de sus recursos ambientales y bajas tasas de ahorro agregado.

La tabla 3, que muestra los resultados del índice de Sostenibilidad Débil de Pearce-Atkinson, contrastados con los resultados de sostenibilidad del índice de huella ecológica (columna “Déficit Ecológico”) nos permite conocer las cifras exactas obtenidas por países

2.5.2. Índice De Acumulación Neta De Capital

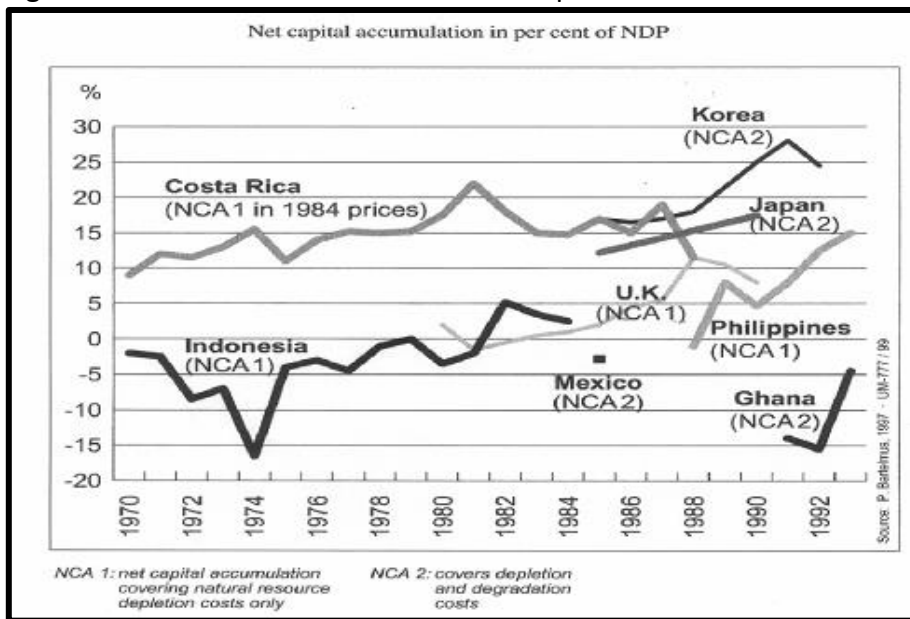
Peter Bartelmus, en la División de Estadísticas del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Organización de Naciones Unidas, ha desarrollado un indicador de sostenibilidad que mide la acumulación neta de capital como porcentaje del PIB y encontró que Países como Indonesia, Ghana y México muestran trayectorias de des - inversión, es decir, de insostenibilidad, en tanto que Costa Rica, Corea, Japón y el Reino Unido obtienen un desempeño sostenible, pues obtiene tasas de acumulación neta de capital positivas (Bartelmus 1999). Como puede observarse, los resultados son, en general, consistentes con los obtenidos por Pearce y Atkinson (incluyendo el hecho del comportamiento “atípico” de Costa Rica, que es sostenible sin tener un alto nivel de renta).

Tabla 3. Índices estimados de sostenibilidad débil y fuerte

PAIS	%AHORRO EN EL INGRESO	DEPRECIACIÓN CAPITAL HECHO POR EL HOMBRE	DEPRECIACIÓN CAPITAL NATURAL	INDICE SOSTENIBILIDAD DÉBIL	DÉFICIT ECOLÓGICO
ECONOMÍAS SOSTENIBLES					
JAPON	33	14	2	17	-5,8
COSTA RICA	26	3	8	15	-1
HOLANDA	25	10	1	14	-4,4
CHECOSLOVAQUIA	30	10	7	13	
HUNGRIA	26	10	5	11	-2,7
POLONIA	30	11	10	9	
ALEMANIA (RFA)	26	12	6	8	
ESTADOS UNIDOS	18	12	4	2	-8,4
ECONOMÍAS APENAS SOSTENIBLES					
MEXICO	24	12	12	0	-1,4
FILIPINAS	15	11	4	0	0,7
ECONOMÍAS INSOSTENIBLES					
PAPUA N. GUINEA	15	9	7	-1	30,1
INDONESIA	10	5	7	-2	1,5
MALAWI	8	7	4	-3	-0,2
NIGERIA	15	3	17	-5	-0,6
ETIOPIA	3	1	9	-7	-0,3
BURKINA FASSO	2	1	10	-9	-0,2
MADAGASCAR	8	1	16	-9	1,9
MALI	-4	4	6	-14	0,3

Fuente: Pearce y Atkinson (1993), Wakernagel y Rees (1996)

Figura 1. Índice de acumulación neta de capital



Fuente: Bartelmus (1997).

Los países con ingresos medios y altos son Sostenibles, en tanto que los de ingresos bajos no lo son.

2.5.3. Índice De Ahorro Genuino

El Departamento de Medio Ambiente del Banco Mundial ha desarrollado una medida de "Contabilidad Nacional Verde" (Hamilton, Atkinson y Pearce 1997) que incluye los costos de la degradación y contaminación ambiental en las mediciones macroeconómicas del desempeño: El Ahorro Genuino es una Medida del desarrollo sostenible en la medida en que incluye la degradación ambiental al lado de la depreciación de los activos producidos por el hombre. La insostenibilidad es interpretada en este caso, como la aparición de tasas de ahorro negativas (o de desacumulación de los activos de capital total) que, de ser sostenidas, implican pérdidas de bienestar económico de largo plazo.

Este indicador puede describirse como:

Ahorro Genuino = Ahorro Neto - Valor Agotamiento Recursos Naturales y Degradación Ambiental)

El índice de Ahorro Genuino o ahorro neto ajustado, toma en cuenta, pues, el ahorro de una economía después de que han sido deducidas las inversiones en capital humano, la depreciación del capital físico y la degradación ambiental.

El Ahorro Neto se estima a partir de la siguiente fórmula:

$$G = GNP - C - dK - n(R - g) - s(e - d) + m$$

Donde:

G : Ahorro Neto,

dK : Depreciación de Capital Producido

$GNP - C$: Ahorro Bruto

$GNP - C - dK$: Ahorro Neto

n Tasa neta de renta de los recursos naturales

$(R - g)$ Agotamiento de Recursos Naturales

s Costo marginal de polución

$(e - d)$ Emisiones - disipación de contaminantes

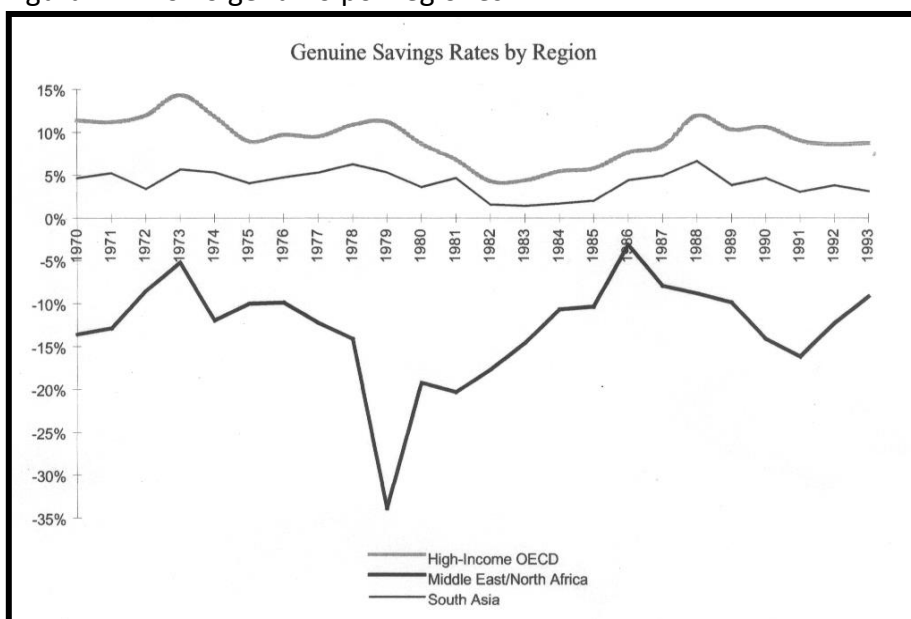
m Inversión en capital humano

El ordenamiento que surge, del desempeño en términos de sostenibilidad en un análisis temporal de 23 años para regiones económicas es le siguiente:

1. Los países del Este de Asia (en el Pacífico) alcanzando los más altos niveles positivos de ahorro neto (cerca del 20%),
2. Los países de alto ingreso en la OCDE, alcanzando cotas del 15%,
3. Los países del Sur de Asia, con niveles persistentes positivos, más o menos estables en el período estudiado,
4. Los países de Latinoamérica y el Caribe, que han experimentado desempeños positivos hasta de un 11%, pero también caídas negativas hasta del 5%,
5. A continuación, y con un desempeño negativo de des - ahorro más pronunciado, las economías del África Sub - Sahariana, con niveles negativos de hasta el 10%,
6. Finalmente, con el peor desempeño, los países del Norte Africano y el Oriente Medio, que no solo alcanzan los niveles de ahorro negativo más bajos (cercanos al 35%), sino que, además, permanecieron durante los 23 años evaluados en niveles negativos, esto, es, en una trayectoria claramente insostenible de largo plazo.

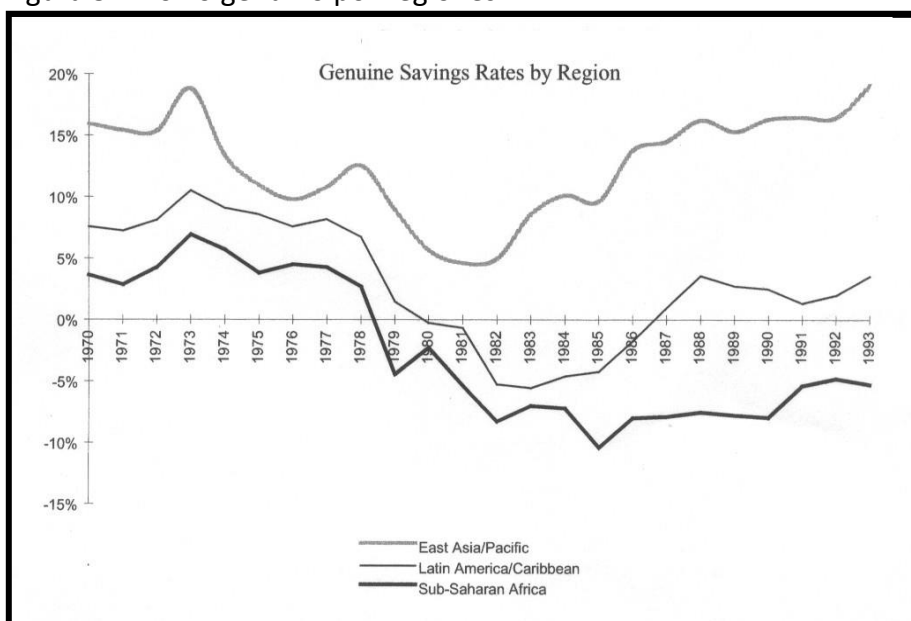
Estos resultados pueden observarse claramente en los gráficos comparativos de ahorro neto que se incluyen a continuación.

Figura 2. Ahorro genuino por regiones I



Fuente: Hamilton y Clemens (1998:12)

Figura 3. Ahorro genuino por regiones II



Fuente: Hamilton y Clemens (1997:13)

2.5.4. Medidas Del Ingreso De Fisher

a) En primer lugar, tenemos la medida Fisheriana “Simple”, que mide el nivel de consumo sostenible, y muestra que la economía Estadounidense el consumo ha sido menor que el ingreso sostenible.

W. Nordhaus (1995) cuantificó tres medidas diferentes del ingreso nacional per-cápita sostenible (incluida una medición Hicksiana ampliada), para la economía estadounidense, en el período comprendido entre 1800 y 1993.

Nordhaus obtiene una medida de ahorro genuino de Fisher, que puede sintetizarse en la fórmula:

$$\text{Tasa de Ahorro Genuino} = \frac{\text{Ingreso sostenible} - \text{consumo}}{\text{ingreso Sostenible}}$$

Tabla 4. Tasas de ahorro sostenible estimadas

TASA DE AHORRO SOSTENIBLE			
PERÍODO	PNN	HICKSIANA CON CAMBIO TÉCNICO	FISHERIANA
1800 – 1993	ND	ND	30,4
1874 – 1993	9,4	ND	33,0
1950 – 1993	8,5	28,3	28,4
1980 – 1993	4,5	11,8	17,9

Fuente: Nordhaus (1995:17)

La tasa de ahorro Genuino Fisheriana para todo el periodo es sostenible: alrededor del 30 - 40%: esto significa que cada generación ha consumido una fracción menor de lo que podría consumir. Posteriormente, en el período desde la segunda guerra mundial, hay una disminución, que es atribuible a la disminución en la productividad.

B) En segundo lugar, tenemos una medida de Ingreso Fisheriano Ampliado, que evalúa no sólo las tendencias pasadas, sino que permite la evaluación empírica de la trayectoria futura.

Para el producto mundial como agregado básico, podemos partir de las siguientes magnitudes:

G, PNN

Y : Producto teniendo en cuenta pérdidas por externalidades y polución

X : Producto Nacional Bruto

P : Polución

L : Trabajo

R : Recursos Naturales

T : Tierra

K : Capital Fijo

H : Tecnología

$\Omega, \Lambda, \Gamma, \Delta$: Elasticidades de sustitución entre factores, funciones de los proporciones factoriales

F : Función de Rendimientos Constantes a Escala

R : Stock Fijo de Recursos Naturales Agotables

μ : Parámetro de nivel de consumo de Recursos Naturales Agotables

g : Tasa de Crecimiento Per - cápita. - cápita

h : Tasa de cambio técnico Neutral de Hicks

Con lo que el producto nacional neto PNN puede expresarse como:

$$Y = G(X, P) = F(L, R, T, K, H)$$

Los recursos Naturales Agotables:

$$R_t = \mu S^* e^{-\mu t}$$

La función Cobb – Douglas Con Cambio Técnico Neutral de Hicks y Elasticidades Constantes que suman 1:

$$Y = F(H, L^\Omega, T^\Gamma, K^\Delta)$$

Las soluciones que pueden obtenerse se reducen básicamente a dos:

a) Un Modelo Pesimista (Límites al crecimiento):

Con una elasticidad de 0,875 se tienen rendimientos decrecientes a escala y es posible especificar un lastre de Crecimiento por Rendimientos Decrecientes y lastre de Crecimiento por Agotamiento de Recursos Naturales:

$$g = \left[\frac{1 - \Omega}{(1 - \Delta)} \right] n - \left[\frac{\Lambda}{(1 - \Delta)} \right] \mu$$

En el que la insostenibilidad, es inevitable.

b) Un Modelo Optimista (Neoclásico):

Con una tasa de cambio técnico de 0,0025%

La tasa de crecimiento modificada por el cambio técnico viene dada por:

$$g = \left[\frac{1 - \omega}{(1 - \delta)} \right] n - \frac{\lambda \mu}{(1 - \delta)} + \frac{h}{(1 - \delta)}$$

Condición para sostenibilidad: El cambio técnico debe ser mayor que el lastre $h > (1 - \omega - \delta)n + \lambda \mu$ con h es el cambio técnico $(1 - \omega - \delta)n + \lambda \mu$ es el lastre sobre el crecimiento (Lastre: 0,00259). Asumiendo una tasa de cambio técnico de entre 0,01 – 0,02 en países desarrollados.

Como conclusión, puede decirse que los efectos de rendimientos decrecientes atribuibles al lastre ambiental sobre el crecimiento económico son sobrepasados, con lo que una tendencia al declive es superada.

Ingreso sostenible-consumo/ingreso Sostenible = tasa de Ahorro Genuino

La condición para que sea alcanzada la sostenibilidad; es que la tasa de crecimiento debe ser mayor que el lastre soportado por la economía: $h > (1 - \omega - \delta)n + \lambda \mu$, h cambio técnico, $(1 - \omega - \delta)n$ es el lastre sobre el crecimiento (Lastre: 0,0025) Asumiendo una tasa de cambio técnico entre 0,01 – 0,02 en países desarrollados.

Como conclusión, puede afirmarse que los efectos de los rendimientos decrecientes atribuibles al lastre ambiental sobre el crecimiento económico son superados, con lo que una tendencia al declive es revertida.

2.6. Mediciones De Sostenibilidad Fuerte

Una de las ideas capitales en la llamada “Economía Ecológica”, es la inter - relación entre los sistemas económico y natural (en la que éste último desempeña diversas funciones tales como servir de sumidero, proveer insumos, etc.). Desde el punto de vista analítico, los diversos autores agrupados en la denominada “Economía Ecológica” (por ejemplo Daly, Perrings o Costanza, entre otros), asocian la sostenibilidad - y por tanto, las medidas

o indicadores de sostenibilidad- con los elementos o componentes bio - físicos del entorno natural que son imprescindibles.

A continuación, observaremos los resultados correspondientes a dos de los indicadores típicos de la Economía Ecológica: un índice puramente “bio - físico”: la Huella Ecológica, y finalmente un conjunto de índices de Intensidad en el uso de Materiales.

2.6.1. ISEW: El Índice De Bienestar Económico Sostenible

El índice de Bienestar Económico Sostenible ISEW (Index of Economic Sustainable Welfare) fue construido inicialmente por Herman Daly y John Cobb Jr, en colaboración con Clifford Cobb. Se trata de un índice de bienestar económico sostenible que pretende encontrar una medida de bienestar más adecuada que el PIB, a partir de una discusión – desde el punto de vista de la identificación del estado estacionario como objetivo de sostenibilidad) sobre índices de bienestar como el MEW de Nordhaus y Tobin (1972).

Los resultados obtenidos, una vez calculado el índice en términos absolutos y per - cápita, mostraron, de un lado, una clara diferencia entre el desempeño medido a través del PNB en la economía de los Estados Unidos de América (corroborando, así, que hay una clara diferencia entre el PNB y las mediciones netas o ajustadas del crecimiento económico); y del otro, una tendencia de largo plazo a la disminución neta del bienestar económico:

“A pesar de las variaciones anuales del ISEW, este indicador señala una tendencia a largo plazo desde fines de los años setenta, hasta el presente, que es en efecto deplorable. El bienestar económico se ha venido deteriorando durante un decenio, en gran medida como resultado de la creciente desigualdad del ingreso, el agotamiento de los recursos naturales y la falta de una inversión adecuada para sostener a la economía del futuro” (Daly - Cobb, 1993: 434).

Años más tarde, Clifford Cobb y un equipo de la organización “Redefining Progress” desarrollaron una versión más sofisticada del ISEW, denominada como “Genuine Progress Index” o “GPI”. Las diferencias entre los dos radican, básicamente en las variables específicas empleadas para realizar la estimación final. En la siguiente tabla pueden observarse y compararse las similitudes y diferencias con mayor claridad (las variables están marcadas con un signo positivo si representan adiciones al bienestar, y con uno negativo en caso contrario).

Tabla 5. Variables ISEW – GPI

	VARIABLES ISEW	VARIABLES GPI
1	Consumo Personal	Consumo Personal
2	Desigualdad Distributiva	Índice de Distribución de Ingresos
3	Consumo Personal Ajustado Por Desigualdad Del Ingreso	Consumo Personal Ajustado por la desigualdad del ingreso
4	Servicios De Trabajo En El Hogar (+)	Valor De Trabajo En El Hogar (+)
5	Servicios Bienes De Consumo Durables (+)	Valor del Trabajo Voluntario (+)
6	Servicios De Calles Y Carreteras (+)	Servicios del Capital Familiar (+)
7	Gasto Público En Salud Y Educación (+)	Servicios De Calles y Carreteras (+)
8	Gastos En Bienes De Consumo Durables (-)	Costo de la Delincuencia (-)
9	Gastos Privados En Defensa, Salud Y Educación (-)	Costo de la Desintegración Familiar (-)
10	Gastos En Publicidad Nacional (-)	Pérdida de Tiempo Libre (-)
11	Costos De Transporte (-)	Costo de Subempleo (-)
12	Costo De La Urbanización (-)	Costo de Bienes de Consumo Duradero (-)
13	Costo De Los Accidentes De Automóvil (-)	Costo de los Desplazamientos (-)
14	Costos De La Contaminación Acuática (-)	Costo de Reducción de la Contaminación de Hogares (-)
15	Costos De La Contaminación Aérea (-)	Costo de Accidentes de Automóviles (-)
16	Costos De La Contaminación Por Ruidos (-)	Costo de la Contaminación del Agua (-)
17	Pérdida De Tierras Húmedas (-)	Costo de la Contaminación Aérea (-)
18	Pérdida De Tierras Agrícolas (-)	Costo de la Contaminación Por Ruidos (-)
19	Agotamiento De Recursos No Renovables (-)	Pérdida de Tierras Húmedas (-)
20	Daño Ambiental A Largo Plazo (-)	Pérdida de Tierras Agrícolas (-)
21	Crecimiento Del Capital Neto (+)	Agotamiento De Recursos No Renovables (-)
22	Cambio De La Posición Internacional Neta (+)	Daño Ambiental de largo plazo (-)
23		Costo de agotamiento del ozono (-)
24		Pérdida de bosques primarios (-)
25		Capital Neto de Inversiones (+)
26		Préstamos Extranjeros Netos (+)

Fuente: Elaboración del autor.

Los constructores del GPI puntualizan que:

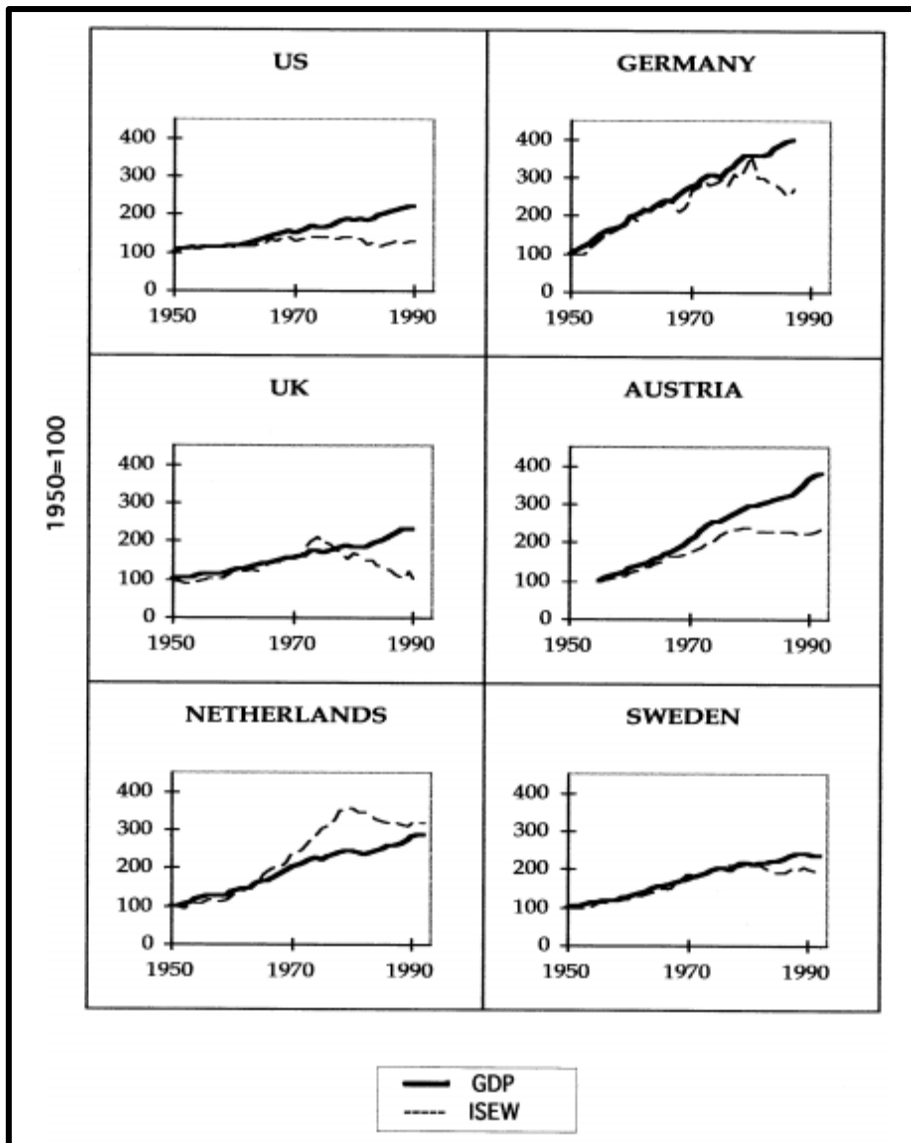
“Específicamente, el GPI revela que gran parte de lo que hoy llamamos el crecimiento o el PIB es en realidad sólo una de tres cosas enmascaradas: la permanencia en disparates y la decadencia social del pasado, tomando prestados los recursos del futuro, o cambiando las funciones de la la esfera tradicional de los hogares y la comunidad hacia la esfera de la economía monetizada” (Cobb et al. 1995).

A manera de ejemplo, pueden tomarse los hallazgos correspondientes a la Economía de los Estados Unidos de Norteamérica: para el período estudiado (1950-2000) se tiene que, en tanto que el PIB per cápita en los Estados creció 200%, el bienestar medido a través del índice de Progreso Genuino creció tan solo 73%. Estos resultados tipifican una situación conflictiva entre el crecimiento económico (aumentando de manera permanente) y el bienestar (que crece mucho menos e incluso se reduce en algunos períodos). Los principal descubrimientos del ISEW/GPI, para un rango cada vez mayor de países -Estados Unidos, Reino Unido, Australia, Alemania, Italia, Austria, Países Bajos, Suecia y Chile- muestran tendencia claras (en mediciones realizadas por un período de 45/50 años):

1. Divergencia apreciable entre los niveles de bienestar indicados por el PIB y los niveles del GPI/ISEW en la totalidad de los 10 países.
2. Crecimiento Sostenido en el nivel de PIB y en el nivel del GPI/ISEW en Austria, Alemania, Italia, Suecia y Países Bajos
3. Crecimiento Sostenido en el nivel de PIB, pero estable o decreciente en el GPI/ISEW (Estados Unidos, Reino Unido, Australia, Chile).

A continuación se presentan, de manera gráfica, los resultados para algunos de los países mencionados.

Figura 4. Crecimiento sostenido en el nivel de PIB y en el nivel del GPI/ISEW entre 1950 y 1990



Fuente: Castañeda (1999:234)

2.6.2. El Índice De “Huella Ecológica”

La huella ecológica como indicador del desarrollo sostenible, está orientado hacia la determinación de los niveles de impacto generados por las actividades socioeconómicas humanas. Se constituye en una aproximación a la medida del tamaño de la “huella” que deja la demanda de recursos naturales disponibles en la red de ecosistemas que sustenta al planeta tierra, en relación con la capacidad ecológica o biocapacidad del planeta para recuperarse de tales impactos.

El indicador fue propuesto por M. Wackernagel y W. Rees (1998) y permite evaluar a escala global, a escala de regiones, países o ciudades el déficit, equilibrio o la reserva de recursos con los que se cuenta en un momento dado en el tiempo.

Teniendo en cuenta que la cantidad de tierra productiva disponible en el planeta es de 11.489.744.000 has, y que la población mundial es de 5744.872 Habitantes, tenemos que la cantidad de tierra productiva correspondiente a cada habitante del planeta es de 2.0 Hectáreas.

Balance Ecológico = Capacidad Biológica - (Huella Ecológica / Espacio Planeta correspondiente Humanos)

$BE = CB - HE / 88\%$ (Espacio del Planeta Correspondiente Otras Especies: 12%)

De tal forma que, un país tendrá Superávit si $BE > 0$, Déficit si $BE < 0$ o Equilibrio si $BE = 0$.

Por Ejemplo, en el caso de España tendríamos un déficit, la huella Ecológica 5.5, la capacidad Biológica es 2.5, el Déficit (3.7), puesto que $2.5 - (5.5 / 0.88) = 3,7$.

De igual manera, puede decirse que el Habitante Representativo de España Supera con creces el 2,0 que corresponde a cada humano en el planeta. La siguiente tabla muestra los resultados de las estimaciones del índice para algunos países seleccionados:

Tabla 6. Índice de huella ecológica estimado (año 2002)

ÍNDICE DE HUELLA ECOLÓGICA	Huella Ecológica Total (ha/persona)	Biocapacidad Total (ha/persona)	Déficit/Reserva Ecológico/a (ha/persona)
MUNDO	2,2	1,8	-0,4
PAÍSES DE INGRESO ALTO	6,4	3,4	-3,0
PAÍSES DE INGRESO MEDIO	1,9	2,1	0,2
PAÍSES DE INGRESO BAJO	0,8	0,7	-0,1
EU-25 + SUIZA	4,7	2,3	-2,4
Finlandia	6,8	12,3	5,4
España	4,9	1,7	-3,2
Reino Unido	5,6	1,6	-4,0
Noruega	5,9	7,0	1,1
AFRICA	1,1	1,3	-0,2
Camerún	0,8	1,4	0,6
Liberia	0,6	3,2	2,6
Somalia	0,2	0,7	0,5
Tanzania	0,7	1,1	0,4
ASIA-PACÍFICO	1,3	0,7	-0,6
Australia	7,0	11,3	4,4
Indonesia	1,0	1,0	-0,1
Japón	4,3	0,8	-3,5
Nueva Zelanda	6,0	15,2	9,2
LATINOAMERICA Y EL CARIBE	1,9	5,5	3,6
Argentina	2,2	6,7	4,5
Brasil	2,1	10,1	8,0
Chile	2,2	5,4	3,2
Perú	0,9	4,2	3,3

Fuente: Elaboración del autor basado en datos de la European Enviroment Agency⁷

2.6.3. Índices De Flujos Materiales

Una de las aplicaciones más completas de la llamada “Ecología industrial” es la estimación de un conjunto de indicadores del flujo de materiales (trhougput, o “transumo”) para cinco economías industrializadas (Austria, Alemania, Japón, Los Países Bajos, Estados

⁷ Véase <http://www.eea.europa.eu/highlights/Ann1132753060>

Unidos de América), hecha por el World Resources Institute en su estudio El peso de las Naciones: La salidas de materiales de las economías industriales “The Weight Of Nations: Material Outflows From Industrial Economies” (Matthews et al. 2000).

Partiendo del hecho de que existe una estrecha relación entre el flujo de materiales y el nivel de actividad económica, es posible verificar si se ha producido el fenómeno de “Desmaterialización”, es decir de uso cada vez menos intensivo de flujos materiales, en el tiempo.

Los indicadores físicos que permiten la evaluación de la sostenibilidad, pueden definirse como:

TMR: Requerimiento Total de Materiales

DMI = Domestic Extraction + Imports: Inputs materiales domésticos

DPO = DMI – Net Additions to Stock – Exports: Output Doméstico Procesado, se refiere a aquellos flujos de materiales extraídos en el país e importados del exterior, arrojados al medioambiente

TDO = DPO + Flujos Ocultos: Producto Doméstico Total

DHF: Materiales movilizados en la actividad económica o flujos “ocultos” de materiales (algunos ejemplos son tierra movida en la construcción, la erosión)

$TMR = DMI + \text{Domestic Hidden Flows} + \text{Foreign Hidden Flows}$: Necesidad Total de Materiales

$NAS = DMI - DPO - \text{Exports}$: Adición Neta al Stock, o material retenido en la economía en forma de bienes durables e infraestructura física.

Las conclusiones generales del estudio pueden resumirse así:

- Las economías industriales se caracterizan por alcanzar niveles mayores de eficiencia en el uso de materiales
- La generación de desechos tiende a aumentar en el tiempo
- La cantidad de inputs que retorna la medioambiente como desecho en una proporción de 50% al 75%
- Las necesidades materiales de las economías industriales varían desde las 11 toneladas métricas en Japón a las 25 toneladas métricas al año en USA
- Se incrementan notablemente si son tenidos en cuenta los flujos ocultos: pasan a ser de unas 25 toneladas métricas en Japón a unas 86 en USA
- En general, las economías industrializadas han logrado una reducción en el flujo de materiales peligrosos tales como el fósforo en los detergentes y materiales pesados.

- Sin embargo, los flujos de los materiales más dañinos siguen creciendo
- El Uso y extracción de combustibles fósiles es el componente principal de los flujos en los países industriales
- Las economías industriales son economías basadas en el carbono.
- La atmósfera es el recurso más afectado por los residuos industriales.

Conclusiones

La revisión de las estimaciones presentadas sugiere que a pesar de la variabilidad que puede constatarse cada vez que evaluamos la sostenibilidad a partir de un indicador específico, la evidencia sugiere que el nivel alcanzado por los problemas ambientales es, indudablemente, preocupante -este es uno de los puntos en los que puede decirse que existe cierto consenso-. Desde el punto de vista de la Política Económica, el énfasis prioritario debe dársele no sólo a los problemas agotamiento de recursos (fuente), sino – además- a los de contaminación global (sumidero). El diagnóstico que habla de fallas en los métodos tradicionales de contabilización del ingreso y el bienestar se trata de otro punto de consenso: además de la crítica de los teóricos neo - clásicos o de sostenibilidad débil, contamos con una variedad de críticas asociadas a la economía ecológica, como el índice de bienestar económico sostenible o ISEW - a partir del cual se ha demostrado de manera consistente la sobre - estimación del producto interno bruto como indicador de bienestar en un conjunto representativo de países.

Algunas variables de importancia para la comprensión de los niveles auténticos de sostenibilidad están prácticamente ausentes en los índices más aceptados y difundidos (tanto de sostenibilidad débil, como de sostenibilidad fuerte):

El profesor Arrow ha hecho referencia a este hecho de gran relevancia, Refiriéndose a las estimaciones en las que los países ricos (con capacidad de ahorro alta) parecen sostenibles, en tanto que los países pobres no:

“Sin embargo, encontramos que esas estimaciones podrían estar sesgadas hacia arriba por diversas razones. Formas importantes de capital natural, cuyo agotamiento disminuye la estimación del cambio en la riqueza, son omitidas. Los precios de mercado se emplean como proxies de los precios sombra...los incrementos en la riqueza per-cápita de las naciones ricas se deben en parte a la inhabilidad de las naciones pobres para valorar sus recursos y sus exportaciones intensivas en recursos a un costo social” (Arrow et al. 2003:27).

Lo cual indica que persisten los problemas teóricos para representar los precios de manera apropiada, en relación a la necesidad de realizar valoraciones que, finalmente, se reflejarán en nuestras apreciaciones acerca de la sostenibilidad y el bienestar. Los puntos en los que realmente existe un fuerte disenso entre escuelas y teorías y aún entre teóricos individuales, se relacionan con la manera en que estos diagnósticos son procesados por modelos específicos, que dan respuestas muy diversas a la pregunta de si el desarrollo sostenible es un objetivo posible y deseable.

CAPÍTULO III

Una Revisión Crítica De Los Modelos De Desarrollo Sostenible (I): Modelos Neoclásicos

3. Una Revisión Crítica De Los Modelos De Desarrollo Sostenible (I): Modelos Neoclásicos

En este capítulo examinaremos aspectos fundamentales de la Sostenibilidad a través de la visión que de éste problema puede ofrecer el análisis “Neo - Clásico”. Nos preguntaremos, en primer lugar, que tipo de significado puede tener la noción de Desarrollo Sostenible en el contexto de esta perspectiva teórica, con el propósito de diferenciarla claramente de las demás opciones disponibles. Estableceremos algunos de los rasgos sobresalientes que caracterizan a los modelos de sostenibilidad propios de ésta tradición teórica. Esta síntesis presenta una variedad de modelos que pueden ser agrupados en tres clases, los cuales en su conjunto nos permiten obtener una relación amplia de medidas de política económica ambiental propias de la Sostenibilidad Débil, en función de los diferentes supuestos característicos en cada tipo de modelo.

Terminamos presentando un balance de las posibilidades y limitaciones del enfoque ofrecido por el análisis “Neo - Clásico”, haciendo énfasis en su concepción particular del capital natural.

La clasificación general de los modelos de sostenibilidad es una tarea compleja, dada la variedad de orientaciones teóricas y las diversas aproximaciones que pueden encontrarse desde el punto de vista de la modelización.

A manera de ejemplo, puede tomarse la reseña del tema hecha por Jeroen Van den Bergh (1986), en la que se mencionan al menos 12 perspectivas teóricas; entre las que pueden destacarse las siguientes: Neo-Clásica de Equilibrio, Neo-Austriaca, Ecológica Evolutiva, Evolutiva Tecnológica, Físico Económica, Biofísico Energética, Ecológica de Sistemas, Histórico Institucional. Cada una de ellas claramente diferenciadas respecto de criterios claros como su utilización (o no) de modelos formales, la inclusión (o no) de conceptos provenientes de la termodinámica, etc.

Sin embargo, la muestra se restringe notablemente si, como es nuestro interés, hacemos énfasis especial en los modelos formales de Desarrollo Sostenible, los cuales han sido elaborados a partir de un conjunto más pequeño de perspectivas. Una buena aproximación puede encontrarse en el análisis de los modelos más representativos hecho por Faucheux, Pearce y Proops (1996), quienes los dividen en modelos Neoclásicos, Evolutivos, de Economía Ecológica y Neo – Ricardianos⁸.

⁸ Generalmente, los trabajos de clasificación referidos a modelos matemáticos dejan de lado las vertientes institucionalistas de análisis medioambiental.

En nuestro caso, presentamos una clasificación compuesta por tres grandes líneas de análisis y política económica: nos referiremos a modelos Neo - Clásicos, Evolutivos y de Economía Ecológica, teniendo en cuenta como criterio adicional, la consistencia alcanzada por las propuestas de política económica. Esa es la razón por la cual en este trabajo de tesis dedicamos una parte sustancial, al análisis de estos modelos, asumiendo que los modelos evolutivos, desde el punto de vista del Desarrollo Sostenible, pueden agruparse, a efectos prácticos, con los de Economía Ecológica.

Como es natural, es de sumo interés la exploración de las medidas de política económica derivadas de este conjunto de modelos formales (“Matemáticos”) de Desarrollo Sostenible”, agregando que es nuestro propósito pasar de la exposición y evaluación de éstas, a la exposición y evaluación de las políticas ambientales específicas. La razón para hacerlo obedece al hecho de que, a la luz de las preguntas y resultados obtenidos con nuestra propuesta de análisis del Desarrollo Sostenible, a partir de la teoría expuesta en los capítulos cinco y seis, aparecen algunas consideraciones específicas que, comúnmente son soslayadas. Un ejemplo de ello es la política Económica de la sostenibilidad para la conservación de los recursos propios de la Biodiversidad.

Desarrollo Y Crecimiento Sostenible En El Contexto De La Teoría Neoclásica De La Sostenibilidad

La inexistencia de un consenso acerca del significado e implicaciones que tienen los conceptos de Sostenibilidad y Desarrollo Sostenible en la disciplina económica es un hecho innegable (Dixon y Fallon 1991) por lo que se hace imperativo, entonces, precisar en cada caso particular (para cada modelo y teoría) cuál es el significado preciso que adoptan estos conceptos.

En términos del análisis “Neoclásico”⁹ se encuentran diversas acepciones para este par de conceptos, que van desde la posibilidad de que se considere innecesario el uso del término “Desarrollo Sostenible”, hasta la aparición de argumentos que permiten pensar que su uso es necesario y útil.

Una de las razones para que esta divergencia de conceptos permanezca, es – seguramente- la dicotomía esencial que existe entre los criterios de maximización y De sostenibilidad; en tanto que el primero hace énfasis en la maximización de la utilidad, el segundo hace énfasis en la equidad intergeneracional (el bienestar de las generaciones

⁹ Para ser más precisos habría que hablar específicamente de la tradición “Neo - Walrasiana” o “Neo Clásica de equilibrio”, como la más representativa dentro del amplio espectro de tradiciones que suelen denominarse “Neo - Clásicas”.

futuras respecto del bienestar de las generaciones presentes): lamentablemente no tenemos pruebas de que el cumplimiento de un criterio garantice el cumplimiento del otro (Arrow et al. 2004).

De otra parte, Partha Dasgupta, sugiere que la existencia de una literatura sólida en el campo del crecimiento óptimo hace innecesario un análisis particular del Desarrollo Sostenible (por ser redundante), cuando menos en el sentido dado al término por el llamado “Informe Brundtland”:

“La idea de desarrollo sostenible se asocia con el Informe Brundtland (Comisión Mundial, 1987). Una extensa literatura ha seguido este camino. Por desgracia, una buena parte ha permanecido desinformada de la literatura más antigua, dirigida hacia una noción más general –la de desarrollo óptimo–”(Dasgupta 1995:111).

Esto supone que los problemas de viabilidad de una economía a largo plazo están contemplados desde tiempo atrás por una tradición sólida que ha sido ignorada por muchos de los defensores del Desarrollo Sostenible como objetivo económico y Social. Implica, además, que en este contexto, estrictamente hablando, debería hablarse del problema de viabilidad como uno de “Crecimiento Óptimo”, si se considera que, de hecho, los problemas ambientales de una economía en el largo plazo deben analizarse a partir de modelos de crecimiento económico correctamente especificados; esto es, realizando medidas adecuadas del Bienestar económico (y el crecimiento) a partir de un índice de Producto Nacional (o Interno) Neto (PNN-PIN) que incluya a los Stocks de recursos naturales y al daño ambiental.

Pareciera pues, que el término Desarrollo Sostenible en sí mismo es inadecuado, impreciso y redundante. No obstante lo contundente del argumento de Dasgupta; autores como John Pezzey sostienen que es posible diferenciar claramente los significados (e implicaciones económicas) que acompañan a los términos “Crecimiento Económico”, “Desarrollo Económico” y “Desarrollo Sostenible”, dependiendo básicamente de la especificación dada a las funciones de producción y de bienestar social que describen el comportamiento del sistema considerado.

Así, por ejemplo, tendríamos que el proceso de Desarrollo estaría dado por el incremento en una función de bienestar social que depende del consumo y del estado del medio - ambiente; en tanto que el Desarrollo Sostenible puede entenderse como un proceso en el que imponemos una condición específica -pongamos por caso- que la función de bienestar social sea no - declinante.

No obstante, aunque es cierto que una conceptualización de este tipo permite la diferenciación conceptual entre el crecimiento y el desarrollo económico, desde el punto de vista del significado estricto que los modelos formales permiten, el rasgo distintivo del análisis Neo - Clásico es que los procesos de Desarrollo y Crecimiento no son cualitativamente diferentes:

“En este contexto formal no podemos representar ideas tales como las de Daly, Georgescu - Roegen o Boulding, según las cuales el desarrollo es cualitativamente diferente del crecimiento”(Pezzey 1989:14).

Por lo que puede concluirse que la opción correcta es la de hablar simplemente de Crecimiento Óptimo o, a lo sumo, de “Crecimiento Sostenible”, cuando hagamos referencia a los modelos propios de esta tradición, con el fin de diferenciarlos claramente de otras propuestas en las que la modelación de tal diferenciación es un objetivo fundamental, como en el caso de la Economía Schumpeteriana y del modelo de estado estacionario en Economía Ecológica.

En este trabajo de investigación, asumimos el estudio de la sostenibilidad haciendo especial énfasis en el problema de sustituibilidad entre factores productivos, dejando de lado el análisis explícito de la equidad inter - generacional, que requeriría un tratamiento específico que nos alejaría de los propósitos de nuestro estudio. Puede decirse que algunos problemas generales que ocupan a la teoría Neo - Clásica de la Sostenibilidad, como por ejemplo la equidad inter - generacional y la sustituibilidad de recursos, están íntimamente ligados, puesto que hay interdependencia entre ellos: si las posibilidades de sustitución tecnológica son grandes, en general, no debería haber problema para mantener niveles aceptables de equidad inter - generacional; en cambio, si son pequeñas, habrá necesidad de proteger el capital natural (Toman, Pezzey y Krautkraemer 1995).

Sostenibilidad Débil, Modelos De Crecimiento Sostenible Y Política Económica

Buena parte de la literatura sobre recursos agotables y progreso técnico son extensiones de los modelos de crecimiento uni - sectorial, en los que se incluye un recurso agotable como insumo de producción, la tecnología es CES, con rendimientos constantes a escala. Se supone la existencia de un planificador central que busca maximizar el valor presente de una función de utilidad cuyo argumento es el consumo per - cápita. Respecto de las condiciones de producción, se emplean funciones de producción de elasticidad de sustitución constante (CES), en las que es usual considerar dos posibilidades:

- Las isocuantas son asintóticas respecto de los ejes y la elasticidad de sustitución es igual a la unidad, o
- Las isocuantas Intersectan a los ejes y la elasticidad de sustitución es mayor que uno.

Tenemos, en este caso, una especificación del proceso de producción en la que las posibilidades de sustitución y de crecimiento y progreso técnico se exploran sin la consideración de restricciones termodinámicas en las que, según veremos adelante, pueden hacerse predicciones optimistas de las posibilidades de alcanzar un “crecimiento sostenible”.

Las posibilidades de que éste último no sea alcanzado, aparecen con la consideración de los efectos del segundo principio de la termodinámica. En tal caso, sencillamente:

“La dificultad con estas condiciones es que parecen ser incompatibles con las leyes físicas” (Toman, Pezzey y Krautkraemer 1995:143).

Si el insumo no renovable es considerado como recurso energético, en el contexto de una función del tipo CES la implicación inmediata es que se requiere un mínimo de energía como insumo. Esto implica una elasticidad de sustitución menor que uno, con lo que se limita la capacidad de producción a largo plazo y, en este caso, el crecimiento podría no ser sostenible, puesto que la posibilidad de mantener el consumo sostenido requiere de amplias posibilidades de sustituibilidad factorial o de la existencia de progreso técnico (en razón a que la elasticidad de sustitución menor que uno limita la cantidad de producto medio y total y, por ello, al consumo total alcanzable).

Entonces, es importante entender que la existencia del crecimiento sostenible a largo plazo hace imprescindible la consideración de variadas posibilidades en términos de la descripción de la producción, la inclusión de restricciones físicas, los valores atribuibles a las posibilidades de sustitución factorial y las condiciones tecnológicas (sin progreso técnico, con progreso técnico exógeno o endógeno).

3.1.1. Modelos Con Sostenibilidad Del Tipo Solow – Hartwick

Llamaremos Modelo Principal al modelo Neo Clásico que supone bien una economía en la que en principio existen grandes posibilidades sustitución tecnológica y que se beneficia del progreso técnico exógeno.

El trabajo clásico de Robert Solow (1974) sobre una economía con posibilidades de sustitución unitarias en la que no hay progreso técnico, le permite afirmar, incluso, que

una catástrofe económico-ecológica puede evitarse y, es un evento altamente improbable.

El mejor de los escenarios posibles, supone que:

- a) Tenemos progreso técnico nulo,
- b) Condiciones de equidad inter - generacional en el consumo de recursos,
- c) La elasticidad de sustitución entre los recursos naturales no renovables y los demás mayor o igual a uno, y
- d) Con una elasticidad de producción respecto del capital reproducible mayor que la elasticidad de producción respecto de los recursos naturales,

Dadas estas condiciones, una población de tamaño constante puede mantener para siempre un nivel de consumo constante (positivo).

El siguiente escenario, supone la existencia de progreso técnico, y conserva las condiciones 1), 2) y 3).

La existencia de progreso técnico aumenta las posibilidades de sostenibilidad en esta economía, e introduce motivos para fundamentar aún más el optimismo alcanzado con el escenario anterior. Si tenemos progreso técnico ahorrador de recursos naturales, las posibilidades de sustitución de los recursos no renovables son grandes, y además la disponibilidad de capital es grande; puede deducirse que el agotamiento de cualquier depósito de recursos naturales no es un problema grave, puesto que es posible invertir la renta de escasez obtenida por la explotación del recurso agotable, y así mantener constante el valor total de la riqueza nacional (natural y hecha por el hombre), lo que a su vez permite sostener un nivel de consumo constante en el tiempo (esta es una expresión de la Regla de Hartwick).

Las posibilidades de ocurrencia de una catástrofe ambiental pueden relacionarse con las elecciones de explotación realizadas por los agentes económicos, pues como anota Solow:

“aún cuando la tecnología y los recursos naturales disponibles pudiesen permitir un nivel constante de consumo per - cápita, o aun un nivel de vida creciente, una preferencia social positiva en el tiempo podría hacer que la sociedad prefiriese la extinción final, dada la explotación que se hace de los recursos naturales no renovables” (Solow 1974:151).

En la mayoría de casos considerados plausibles, el resultado final permite pensar que las posibilidades de un colapso económico están lejos, pues el agotamiento de un recurso no

renovable puede superarse a partir de un cambio sucesivo de tecnologías basadas en alguna clase de recurso agotable, hacia otro (Carbón, Petróleo, etc.).

Además, queda la posibilidad de pensar en la existencia de una tecnología de contención ("Back stop Technology"); definida como aquella que es inagotable y capaz de sustituir a un recurso no renovable a un coste elevado, pero que es inagotable a escalas de utilización humana (El uranio U^{238} , la licuefacción de carbón, la fusión nuclear, la energía solar).

El modelo de Nordhaus (1995) nos permite observar la manera en la que el cambio técnico afecta las posibilidades de sostenibilidad:

Sean:

G : PNN

Y : Producto teniendo en cuenta pérdidas por externalidades y polución

X : Producto Nacional Bruto

P : Polución

L : Trabajo

R : Recursos Naturales

T : Tierra

K : Capital Fijo

H : Tecnología

$\Omega, \Lambda, \Gamma, \Delta$: Elasticidades de sustitución entre factores,

F : Función de Rendimientos Constantes a Escala

R : Stock Fijo de Recursos Naturales Agotables

μ : Parámetro de nivel de consumo de Recursos Naturales Agotables

g : Tasa de Crecimiento Per - cápita

h : tasa de cambio técnico Neutral de Hicks

El PNN puede expresarse como:

$$Y = G(X, P) = F(L, R, T, K, H)$$

Recursos Naturales Agotables:

$$R_t = \mu S^* e^{-\mu t}$$

Función Cobb – Douglas Con Cambio Técnico Neutral de Hicks y Elasticidades Constantes que suman 1:

$$Y = F(H, L^{\Omega}, R^{\Lambda}, T^{\Gamma}, K^{\Delta})$$

Tasa de crecimiento modificada por cambio Técnico, en la que se tienen en cuenta los efectos negativos del agotamiento de recursos naturales y los rendimientos decrecientes:

$$g = - \left[\frac{1 - \omega}{(1 - \delta)} \right] n - \frac{\lambda \mu}{(1 - \delta)} + \frac{h}{(1 - \delta)}$$

Condición para sostenibilidad: Si el cambio técnico es mayor que el lastre $h > (1 - \omega - \delta)n + \lambda \mu$.

Como vimos en el capítulo anterior, las estimaciones confirman que efectivamente el cambio técnico es mayor que el lastre o efecto negativo.

Tenemos, pues, en todos estos casos una clara muestra del optimismo tecnológico.

Las políticas económicas correspondientes serían -siguiendo a Solow-:

- La utilización de incentivos positivos o negativos de mercado, más que cambios institucionales globales.
- El establecimiento de alguna institución cuyo objetivo sea corregir (anticipándose a los movimientos futuros) los desequilibrios en la explotación de los recursos, pues la secuencia de explotación de éstos podría ser miope a corto plazo.
- Estimular la formación y organización de mercados de futuros para los recursos naturales,
- Realizar algún tipo de “planeación indicativa”, a través de la organización de sistemas o formas de recolección y difusión de información respecto de las tecnologías disponibles, los movimientos y cambios de la demanda y las reservas de recursos disponibles.

Podría decirse que una de las señas de identidad de la política económica asociada a éste modelo en el que se describe al capital natural básicamente como un stock de recursos a ser utilizados como input en la producción, es la prescripción de que el objetivo de crecimiento sostenible implica la conservación de la capacidad de contar con niveles de inversión total neta adecuados, lo cual no implica conferir al capital natural alguna condición cualitativa especial. Es por ello, que la idea de conservar intacto algún recurso natural (o gran parte de éstos) no es una condición necesaria para que una economía pueda considerarse sostenible:

“Si la sostenibilidad significa algo más que un vago compromiso emocional, debe requerir que algo se conserve en el muy largo plazo. Es muy importante entender qué es ese algo: creo que tiene que haber una capacidad generalizada para producir bienestar económico. Tiene mucho sentido insistir en que determinados activos únicos e insustituibles deben preservarse por su propio bien...Pero ese tipo de situación no puede ser universalizada: no sería posible ni deseable "dejar el mundo como lo encontramos" en cada detalles particular. La mayoría de los recursos naturales usuales son deseables por lo que hacen, no por lo que son...” (Solow 1993:14).

Así, una trayectoria de crecimiento sostenible no es la que conserva elementos singulares, pues lo importante es la conservación del valor total de los activos disponibles, lo que permite que las generaciones futuras dejen, si es necesario, intacto el legado de capital para las generaciones futuras. Usualmente esta regla o condición de sostenibilidad es denominada como “Regla de Hartwick”, pues, como señalamos antes, la sociedad puede invertir las rentas obtenidas de la explotación del capital en la preservación de su capacidad para sostener un nivel constante de consumo en el futuro, y esto le permite permanecer en una trayectoria de sostenibilidad.

A pesar de la claridad del análisis sugerido por Solow, existe una alternativa que podríamos denominar como “Modelo Secundario”; cuya característica es la de considerar los cambios que pueden ocurrir en casos en los que las posibilidades de sustitución tecnológica se restringen. En su libro *La Economía de los recursos agotables* “*The Economics Of exhaustible Resources*”, los Profesores Partha Dasgupta y Geoffrey Heal, presentan una exploración exhaustiva de modelos de crecimiento neo - clásicos en los que se incluye una variedad de casos, de los cuales es importante destacar uno en especial. Nos referimos a aquél en que las restricciones termodinámicas asociadas a la Segunda Ley de la Termodinámica, es decir, la “Ley de Entropía”, se consideran explícitamente en la modelación de las posibilidades de producción. A efectos de éste análisis es importante anotar que, para Dasgupta y Heal el modelo “principal” es el más plausible, en tanto que el modelo “secundario” es menos relevante, pero es analíticamente relevante.

El modelo principal, se ocupa del problema del agotamiento de recursos y la acumulación de capital en una economía competitiva, mediante el uso de una función de producción en la que se incluyen

K : capital físico

R : recursos naturales

L : trabajo

T : Tiempo

La función es estrictamente cóncava y homogénea de grado uno en K, R , y L , y que puede asumirse como una función CES con elasticidad de sustitución unitaria, la función es del tipo Cobb - Douglas:

$$Y = F (K_1^\rho + R_2^\rho)$$

En este caso particular existen dos posibilidades de viabilidad: uno en el que $F (K, 0)$ es decir, en el que los recursos naturales no son esenciales para la producción, puesto que la elasticidad de sustitución unitaria permite una sustitución factorial perfecta. El otro caso, en el que la elasticidad de sustitución es menor que uno, y por lo tanto $F (K, 0)$ es imposible, con lo que los recursos naturales son imprescindibles o esenciales para la producción: el producto por unidad de recurso utilizado es limitado y finito y podría declinar hacia cero.

Esto sería cierto en caso de que no haya cambio técnico. Pero si sí se supone que la elasticidad - producto del capital es mayor que la elasticidad - producto de los recursos naturales, la producción puede mantenerse indefinidamente sin importar la cantidad de recursos naturales con que cuente esa economía. Además de este “contexto tradicional” de análisis, existe otra posibilidad, a la que denominamos como “modelo secundario”, el cual se caracteriza por la aparición de problemas de eficiencia en la economía y el hecho de tener en cuenta el segundo principio termodinámico, con lo que tenemos un cambio sustancial en la forma que tiene la función de producción.

En particular, sí se interpreta el recurso agotable R , como un recurso energético:

“La existencia de un input mínimo de energía necesario para alcanzar un nivel dado de output provee información importante acerca de la forma de las isocuantas de la función G . En particular, esto implica que cualquier isocuanta debe tener una asíntota paralela al eje K en el valor mínimo...” (Dasgupta y Heal, 1981:208).

Este hecho implica que la elasticidad de sustitución entre el capital y los recursos naturales sería menor que uno, por lo que se puede concluir que la función de producción típica viola los principios termodinámicos siempre que entre los insumos considerados haya una fuente energética.

Las consecuencias derivadas de esta observación son amplias: desde el punto de vista analítico, las conclusiones derivadas del modelo “principal” son cuestionables a tal punto que, puede decirse que el crecimiento sostenible, lejos de ser un resultado muy probable, está lejos de ser un objetivo de fácil alcance.

Por ejemplo, una trayectoria eficiente sería alcanzable solo si se mantiene permanentemente el precio de la energía relativamente alto respecto de los demás precios de la economía, para evitar su agotamiento prematuro.

Resultados análogos fueron alcanzados por Barbier y Markandya (1990), con un modelo en el cual no existe sustitución total entre los capitales natural y hecho por el hombre, en el que se asume la necesidad de mantener un nivel de capital natural mínimo (para prevenir una catástrofe ecológica, que podría destruir las posibilidades de existencia del propio bienestar humano).

La modificación del modelo básico, para incluir especificaciones más completas desde el punto de vista de la consideración de ciertas condiciones derivadas de principios de la termodinámica, es –de hecho- nuestra segunda tipología dentro de la visión Neoclásica de la sostenibilidad.

3.1.2. Modelos Con Restricciones Termodinámicas

Es posible también encontrar un segundo tipo de modelos, que conservan los supuestos de sustitución originales del marco de Solow – Hartwick, pero asumen una especificación de la producción que tiene en cuenta de manera explícita el principio del balance de materiales, es decir, que son más completos en su descripción del proceso económico si se considera que su especificación reconoce explícitamente la interacción realizada por los sistemas económico y natural.

En el modelo de Pezzey (1989), el Desarrollo Sostenible puede entenderse como la obtención de niveles crecientes de bienestar económico, teniendo en cuenta los cambios producidos por las actividades económicas en la calidad del medio ambiente.

La producción depende del capital físico, el trabajo, el capital humano, el stock de recursos naturales, el flujo de recursos naturales, y los desechos arrojados al medio ambiente, y se puede expresar como:

$Y = Y(K, L, H, F, Q_1)$ Producción del output agregado en términos de la calidad ambiental.

El crecimiento del capital es igual a la inversión bruta realizada en equipo menos la depreciación del capital

$$\dot{K} = I_k - \delta k_k \text{ Crecimiento del capital}$$

El crecimiento de la tecnología es igual a la inversión bruta hecha en capital humano menos la depreciación

$$\dot{T} = I_t - \delta I_t \text{ Crecimiento de la tecnología}$$

El crecimiento del Stock de recursos naturales puede expresarse como la tasa de crecimiento natural de los recursos naturales menos la extracción (Por supuesto, para los recursos naturales no renovables, la tasa de crecimiento natural es nula.

$$\dot{N} = p(N, X) - f \text{ Crecimiento del stock de recursos naturales}$$

El bienestar social (expresado en niveles de utilidad) depende de los niveles de consumo y los niveles de calidad ambiental:

$$U = U(C, N, P) \text{ Función de utilidad social o}$$

$$U = U(C, Q_2) \text{ Función de utilidad social dependiente de la calidad ambiental.}$$

El uso sostenible de los recursos naturales es una elección de los individuos entre el gasto en consumo o el gasto en “limpieza y control” ambiental, de manera que el ingreso se divide entre el consumo y el gasto en “limpieza” del medio ambiente:

$$Y = C + S$$

La calidad ambiental esta en función de los incrementos en la producción (a mayores niveles de producción se generan mas contaminación y desechos); pero éstos pueden mitigarse mediante incrementos en el gasto el “limpieza y control” del medio ambiente

$$Q = Q(Y, S); \quad Q_Y < 0, Q_S > 0$$

$$dE = Q_Y dY + Q_S dS$$

El incremento en el bienestar social implica que los consumidores deben hacer la elección entre el gasto en consumo y el gasto en “limpieza y control” ambiental; es decir, los niveles de bienestar humano dependen del dinero destinado a mantener la calidad medioambiental.

$$U [C, S] = U [Y - S, Q (Y, S)]$$

En resumen, si se entiende el objetivo de sostenibilidad como la posibilidad de mantener sin límite los niveles deseados de producción y consumo futuros, podemos pensar que en una economía en crecimiento, con posibilidades de cambio técnico (aumentador de recursos) la política económica aconsejable es la acumulación de capital a una tasa suficiente para invertir en limpieza y control de los daños ambientales y reponer los recursos naturales consumidos.

Tanto el uso sostenible de un recurso, como la sostenibilidad global de la economía dependen, en consecuencia, del gasto para revertir los daños causados y controlar la polución ambiental.

Este modelo nos deja ver, de manera clara que, según este tipo de modelo, las políticas de ahorro son preferibles para alcanzar la sostenibilidad, respecto de las de preservación del capital natural.

3.1.3. Modelos De Crecimiento Endógeno

El caso en el que estamos en una situación de cambio técnico endógeno, puede ofrecernos el tercer tipo de modelo. En cuanto al “Crecimiento Endógeno” y el problema medioambiental, en general, las extensiones del análisis neoclásico del crecimiento se refieren en su mayoría a modelos del tipo Solow, y los análisis de los problemas de escasez de recursos naturales en el contexto de los modelos de crecimiento endógeno son demasiado pocos aún:

“Sin embargo, es indiscutible que la página de la utilización de recursos en la historia del crecimiento endógeno está, en gran parte, en blanco” (Pitchford 1997:433).

El propio Pitchford ha desarrollado un modelo en el que se incluyen los efectos económicos del “Learning by Doing” en un contexto de recursos naturales agotables. Partiendo del hecho de que la producción se realiza a partir de dos factores:

R : Recursos naturales agotables

r : Tasa de extracción de los recursos naturales

L : Stock de recursos, entonces:

$L = r$: $r > 0$ y el consumo total, c , será:

$$c = G(R) - x(r, L) + c$$

Siendo G el producto correspondiente a los recursos agotables y x el costo de extracción de recursos a la tasa r .

En general, sí existe un nivel de agotamiento de recursos L' asociado a efectos de "Learning by Doing" derivado del uso de recursos naturales, los costos de extracción son decrecientes si $L' > L$, y puede decirse que son posibles incrementos de la producción y el consumo permanentes, aunque es posible que haya caídas en éstos si los efectos de aprendizaje disminuyeran.

Aunque resulta demasiado prematuro, con un modelo como éste, hablar de la política económica recomendable, puede decirse que, en principio, es esperable que los efectos del cambio técnico, derivados de efectos positivos de aprendizaje, refuercen la creencia de que es plausible conservar el optimismo tecnológico a largo plazo, aunque esté presente la posibilidad de eventuales caídas en los niveles de consumo y producción.

Algunos de los resultados más interesantes y sólidos en el campo de los modelos de crecimiento endógeno han sido obtenidos por Philippe Aghion y Peter Howitt en su libro *La Teoría del Crecimiento Endógeno "Endogenous Growth Theory"* (Aghion y Howitt 1998)¹⁰. Ellos muestran el tipo de condiciones que permiten alcanzar la sostenibilidad en dos clases de modelo: con tecnología "AK" y "Schumpeteriano".

Partiendo de algunas definiciones básicas, asumimos que:

Y : Nivel de producción

E : Indicador de calidad ambiental, que tiene posibilidades de regeneración y puede tomarse como un bien de capital que puede ser agotado por la polución.

¹⁰ El modelo de Aghion y Howitt, posee la particularidad de incluir una restricción ecológica a manera de "Umbral", que ha sido tomada de la tradición de la "Economía Ecológica", con lo cual sintetiza aspectos de ambas tradiciones. Eso implica que las condiciones de análisis sean un tanto diferentes a las alcanzadas por los modelos Neo-Clásicos tradicionales.

$U(c, E)$ es una función instantánea de utilidad que define el bienestar.

P Flujo de polución, que está en función creciente del nivel de producto y de la intensidad de polución $P(Y, z)$

Tenemos un parámetro que mide la intensidad de la polución, z

La siguiente ecuación diferencial muestra el comportamiento temporal de la calidad ambiental:

$$\dot{E} = -P(Y, z) - \emptyset E$$

Donde $\emptyset > 0$ es la tasa de regeneración potencial máxima que posee el medio ambiente (Restricción 1). Existe, pues, un límite inferior bajo el cual la calidad ambiental supera su umbral ecológico.

La trayectoria de crecimiento óptimo tiene, entonces, la siguiente restricción:

$$E^{min} > E(t) > 0 \text{ para todo } t \text{ (Restricción 2).}$$

El stock de recursos naturales no renovables, S , debe permanecer no negativo y su tasa de cambio es el negativo del flujo de extracción de recursos, R .

La función de producción agregada para esta economía es, entonces:

$$Y = F(K, B, R, z)$$

Y se considera que la trayectoria de crecimiento óptimo maximiza la expresión:

$$\int_0^{\infty} e^{-\rho t} u(c, E) dt$$

Que está sujeta a los valores iniciales de capital, recursos naturales y calidad ambiental.

El índice Hamiltoniano correspondiente es:

$$H = u(c, E) + \lambda K + \xi E + \varepsilon S$$

Con el consumo, investigación, intensidad de la polución y extracción de recursos como variables de control. Este Hamiltoniano expresa el Producto nacional neto (PNN) "verde", que incluye la depreciación de los recursos naturales y del medio ambiente.

La pregunta de si puede (o no) alcanzarse el Desarrollo Sostenible, es –desde el punto de vista de este modelo básico- ¿Existe o no una trayectoria de crecimiento óptimo en la cual el PNN crezca sin límite?

En el modelo AK con umbrales ecológicos el Desarrollo Sostenible no es posible, pues la función de producción es:

$$Y = Akz$$

Esto implica que la utilización de tecnologías “limpias” requiere la obtención de menos producto por unidad de insumo empleada en el proceso productivo, y está sujeta a las restricciones 1 y 2.

La tasa de polución o contaminación no puede exceder el límite de tolerancia ecológica indefinidamente sin causar una catástrofe medio ambiental, causada por la reducción asintótica que exhibe la intensidad de polución ante el crecimiento sin límite del capital.

En el caso del modelo “Schumpeteriano”, el Desarrollo Sostenible si puede alcanzarse.

Con una función de producción:

$$Y = K^{\alpha}(BL)^{1-\alpha}z$$

La evolución del capital intelectual está dada por la ecuación $\dot{B} = \delta\eta mB$, donde B es un parámetro que indica la calidad promedio de un bien intermedio, ηm es la frecuencia con la que ocurren las innovaciones (para todo el sistema económico)¹¹.

En el largo plazo K y Y pueden crecer a la misma tasa sin que haya una tasa de retorno decreciente al capital, gracias a que la tasa de crecimiento del capital intelectual es mayor que la del capital tangible.

Puede probarse que bajo ciertas condiciones precisas, existen valores iniciales de los stocks de capital tangible y capital intelectual (K, B) para los que una trayectoria de crecimiento óptimo o sostenible puede ser alcanzada.

La diferencia en las conclusiones (opuestas) alcanzadas en estos modelos endógenos de crecimiento radica en el siguiente hecho: Hacer una distinción explícita entre los capitales físico e intelectual, implica que las tecnologías innovadoras son relativamente más

¹¹ En el que, η - a su vez- es un parámetro (positivo) de investigación tecnológica y n el número total de trabajadores.

“limpias”, por lo que los incrementos en la producción implican disminuciones en la intensidad de polución z . En el modelo Schumpeteriano, las oportunidades de alcanzar el Desarrollo Sostenible, o –más precisamente- el “Crecimiento Sostenible” dependen de la existencia de un flujo estable de innovaciones tecnológicas.

Al parecer, la existencia del progreso técnico ahorrador de recursos naturales ha permitido hasta ahora al planeta soportar la expansión económica experimentada desde la revolución industrial, pero:

“Aunque no hay nada en la teoría del crecimiento endógeno que implique que estas tendencias necesariamente sostienen el desarrollo en el futuro indefinido, sin embargo, la teoría implica que con bastantes innovaciones y en la dirección adecuada, tal resultado está al menos dentro del reino de lo posible” (Aghion y Howitt 1988:151).

Y puede afirmarse, además, que una de las condiciones básicas para que el crecimiento sea sostenible es la siguiente: el valor de la elasticidad de sustitución inter - temporal en el consumo debe ser menor que la unidad, en el sentido de que debe actuar como una restricción que es precisa para evitar que los agentes racionales elijan un nivel de deterioro ambiental que supere la capacidad de reacción del medio ambiente.

El optimismo tecnológico efectivamente se refuerza con la utilización de modelos del tipo Schumpeteriano, aunque que el problema de los recursos naturales agotables es menos importante que los problemas relacionados con la polución y contaminación ambiental.

Conclusiones

Los modelos Neo - clásicos de crecimiento sostenible han incorporado elementos importantes y necesarios para el estudio del problema ambiental a largo plazo; como puede deducirse de nuestro análisis, actualmente son más variados y ricos en matices de lo que podría pensarse a priori.

Incluyen en su descripción del proceso de producción la interacción con el medio ambiente de diversas maneras; ya sea mediante la inclusión de las condiciones de balance de materiales, las consecuencias del principio de entropía y la modelación de funciones del medio – ambiente como proveedor de insumos, proveedor de energía, o sumidero; o incluso haciendo algunas aproximaciones a restricciones de capacidad de carga o umbral ecológico.

Si bien es cierto que algunos críticos agudos -Por ejemplo Georgescu - Roegen y Herman Daly- señalaron como una falla imputable al modelo “Neo - Clásico” básico la ausencia de interacciones con el medio ambiente (describiéndolo como un modelo en el que el sistema económico se representa como un flujo circular monetario cerrado); puede verificarse que el desarrollo de la economía ambiental y su integración en la economía del crecimiento, ha dado como resultado una evolución que implica que no pueda decirse actualmente que tal crítica es pertinente en un sentido estricto.

El diagnóstico y las políticas en términos de los modelos Neoclásicos de Crecimiento Sostenible depende sensiblemente de dos elementos: la especificación de la función de producción y la especificación de la interacción economía/ medio – ambiente. Se configura una política de Sostenibilidad Débil entendida como aquella en la que se asume la posibilidad de sustituir los tipos de capital; aunque puede decirse que es posible que sea necesaria una política de sostenibilidad fuerte, (por ejemplo en el modelo que hemos llamado “secundario”, tal posibilidad es considerada –en general- como menos relevante desde el punto de vista empírico.

La Economía Neoclásica ha desarrollado a partir de la aceptación de éstos principios, variantes diferentes y dos cursos de acción claramente identificables: en un caso, se supone que las restricciones “físicas” permiten la coexistencia de la actividad económica y el medio ambiente prácticamente “por siempre” (esto, en el “modelo Principal”). En el otro, las restricciones físicas pueden impedir esa coexistencia muy prolongada (“modelo Secundario”). Las políticas derivadas en el primer caso están fuertemente relacionadas con un manejo competitivo de los mercados, los que se supone funcionan como mecanismos que proporcionan las señales correctas respecto del estado de los recursos naturales. En el segundo caso las políticas están relacionadas con medidas de regulación, establecimiento de impuestos y elevación “artificial” de los precios de los recursos naturales; es decir, un curso de acción similar al propuesto por la Economía Ecológica.

La consideración de las restricciones “físicas” puede generar, que se considere que el papel del mercado, del mecanismo de asignación de recursos, como primordial o secundario, según sea el caso.

Aún teniendo en cuenta que posiblemente el modelo “optimista” sea plausible, algunos autores han insistido en señalar algunas limitaciones importantes de éste:

“creemos que una de las lecciones más importantes que pueden extraerse de la literatura examinada aquí es que la sostenibilidad no es sinónimo de conseguir

automáticamente la eficiencia en el sentido convencional de maximizar el valor presente de utilidad en el tiempo” (Toman, Pezzey y Krautkraemer 1995:157).

Podría ocurrir que la tasa total de ahorro (expresada tanto en acumulación de capital como en mantenimiento del capital natural) fuese demasiado baja para mantener o expandir la utilidad, aun cuando las posibilidades de disfrutar de los beneficios del cambio técnico sean favorables.

La construcción matemática de los modelos, que hace equivalentes todos los tipos de capital, podría dar menos importancia al mantenimiento del capital natural, de la que realmente tiene si se considera que muchas funciones ambientales son insustituibles y que los daños causados al medio ambiente pueden ser irreversibles y esta situación es capturada de manera muy imperfecta. En consecuencia, las prescripciones de política usuales -internalizar las externalidades ambientales, e introducir mejoras en las condiciones competitivas de los mercados- pueden ser insuficientes.

Otra de las implicaciones importantes del modelo de sostenibilidad débil es que la sostenibilidad puede ser alcanzada más fácilmente por economías con asignaciones altas de capital (las sociedades más pobres pueden tardar más tiempo o simplemente pueden ser insostenibles).

Una de las limitaciones más importantes de la concepción Neoclásica del crecimiento sostenible es el énfasis puesto en dos de las funciones del capital natural (Fuente – Sumidero). Por contraste, puede decirse que, si se asume que el medioambiente es una red de ecosistemas que proveen servicios ambientales singulares; debe considerarse la posibilidad de conservar la capacidad de esa red para proveer bienestar, en vez de privilegiar la conservación de algunos recursos naturales aislados (“museos de naturaleza”).

Los modelos “principal” y “secundario” exhiben problemas de especificación respecto del primer principio termodinámico (el conjunto de producción no incluye la generación de desechos). En cuanto al segundo principio, el modelo “principal” se basa en su exclusión, en tanto que el “secundario” además de incluir los efectos entrópicos, aporta elementos teóricos novedosos e importantes, al establecer la correcta especificación que el conjunto de producción debe tener si se asume que las reservas energéticas son agotables, y por lo tanto la forma de la función de producción debe variar substancialmente.

Las consecuencias para la política económica, en general, son variadas: puede, el analista, pasar desde el optimismo tecnológico acerca de las posibilidades de alcanzar el objetivo de sostenibilidad si usamos el modelo “principal”, hasta el pesimismo tecnológico derivado de las limitaciones que las posibilidades de sustitución tecnológica exhibe en el modelo “secundario”: la imposibilidad de alcanzar la sostenibilidad.

CAPÍTULO IV

Una Revisión Crítica De Los Modelos De Desarrollo Sostenible (II): Modelos De Economía Ecológica

4. Una Revisión Crítica De Los Modelos De Desarrollo Sostenible (II): Modelos De Economía Ecológica

La Economía Ecológica Y El Análisis De Los Problemas Ambientales

En este capítulo, nuestro propósito principal es analizar las posibilidades de política económica ambiental que pueden derivarse de la corriente teórica conocida como “Ecological Economics. Se ofrece un balance crítico de los rasgos esenciales de ése modelo y las conclusiones que de él se derivan.

El análisis de los problemas ambientales mediante la utilización de unos presupuestos teóricos comunes que pueden denominarse como “Economía Ecológica” es -en términos relativos- reciente; básicamente toma cuerpo en la década de los años ochentas, aunque tiene antecedentes que se remontan a una primera etapa, con los trabajos de los autores pioneros como Frederick Soddy, Podolynski, entre otros, que propusieron algunos de los problemas fundamentales para esta sub-disciplina (las características de esta etapa están documentadas extensamente en el trabajo de Martínez-Alier y Schlüpmann 1991). Ejemplos de ello son la preocupación por la formulación de una “economía energética” o los intentos de relacionar el proceso económico con su sustrato físico – biológico.

Una segunda etapa, correspondiente a los creadores de la moderna economía ecológica, puede situarse entre finales de los años cincuentas y los años setentas. Desatacan especialmente los trabajos de Kenneth Boulding, quien propuso ideas, conceptos y propuestas de profundo impacto: La idea del balance de materiales, derivada de principios físicos, el concepto de “Space - Ship Earth” (la tierra como nave espacial o proceso cerrado), y la integración de modelos propios de la ecología con modelos económicos son ejemplos claros de ello.

De igual manera, Nicholas Georgescu – Roegen ha marcado en buena medida la agenda de investigación en economía ecológica con sus análisis de las implicaciones de la Ley de la Entropía en el análisis económico. Su idea de “Escasez Absoluta” como concepto diferente del de “Escasez Ricardiana”, y sus propuestas de integración de conceptos de la Termodinámica en la Economía siguen generando debates intensos en la actualidad.

Otro de los autores definitivos para la consolidación ha sido, sin duda, Herman Daly, quien, además de desarrollar ideas propuestas por Kenneth Boulding (por ejemplo el balance de materiales, la economía en estado estacionario) y Georgescu – Roegen (escasez absoluta); promovió de manera especial la inclusión en el análisis económico de

conceptos biológicos y ecológicos, como por ejemplo, el de “Capacidad de Carga”, que le ha llevado a insistir en la idea de un Límite bio - físico a la escala que puede alcanzar el subsistema económico humano.

Una tercera etapa, de consolidación propiamente dicha, puede observarse claramente a partir de los años ochentas; impulsada por una variedad de autores que reflejan una pluralidad de enfoques notable, y por la conformación de la “Internacional Society For Ecological Economics”.

Surgen, en consecuencia múltiples líneas de investigación: La modelización de sistemas ecológico – económicos o la economía energética con Robert Costanza; la Ecología Política con Joan Martínez – Alier; La modelación Neo – Austríaca aplicada a los problemas ambientales con Malte Faber y John J. Proops; El análisis Neo - Ricardiano aplicado a sistemas ecológico – económicos con autores como Martin O’Connor, la teoría de la Co - evolución con Richard Norgaard, o la aplicación del concepto ecológico de resiliencia en modelos de desarrollo sostenible, con Charles Perrings.

Finalmente, pueden notarse líneas de convergencia que han resultado en esfuerzos por desarrollar el concepto de capital natural y algunos principios de Política Económica comunes, algunas de las cuales serán expuestas a continuación.

4.1.1. El Capital Natural en la Economía Ecológica

Desde el punto de vista de la economía ecológica, en general, se considera que existen tres categorías básicas de capital: el capital humano, que puede ser considerado como “capital cultural”; el capital manufacturado (estos dos tipos de capital en su conjunto pueden llamarse “capital hecho por el hombre”) y, finalmente, el capital natural. Este último puede dividirse, a su vez, en dos tipos de capital: recursos renovables y recursos no renovables, que generan un flujo llamado “servicios ecológicos” o “servicios ambientales”.

El concepto de “servicios ecológicos” se refiere a una multiplicidad de procesos y funciones propias de los ecosistemas - tales como la asimilación y reciclaje de residuos o el mantenimiento de las especies. Según Fikret Berkes y Carl Folke (1994), una buena representación de la interacción entre estos diferentes tipos de capital, se obtiene si pensamos que el capital cultural es la “interfase” entre los capitales natural y hecho por el hombre.

4.1.2. El Concepto de Función Ambiental

Otro de los conceptos comúnmente aceptados por los teóricos de la Economía Ecológica es el de “función ambiental”, el cual puede definirse, en general como:

“La capacidad de los procesos naturales y los componentes para proveer bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas (directa e/o indirectamente)” (De Groot 1992).

Los cuatro grandes grupos de funciones ambientales serían, según De Groot:

1. Las “funciones de regulación” de los procesos ecológicos –
2. Las “funciones de carga” (principalmente la provisión de espacio)
3. Las “funciones de producción” de recursos materiales y energéticos
4. Las “funciones de información, por ejemplo el mantenimiento de la salud mental para proveer oportunidades de reflexión, desarrollo cognitivo o experiencia estética.

A su vez, estos grupos básicos pueden subdividirse (por ejemplo, el propio De Groot, provee más de 30 ejemplos de función ambiental). Una de las conclusiones que ha alcanzado consenso entre los teóricos de la economía ecológica es que, la insustituibilidad de muchas de éstas funciones ecosistémicas y ambientales es un hecho fundamental que debe ser tenido en cuenta en el análisis económico.

Una cierta jerarquización de las funciones puede hacerse si se distinguen (tal y como lo hace el proyecto CRITINC) las “Funciones De” – aquellas que mantienen la integridad del sistema natural- de las “Funciones Para” –es decir, aquellas que proveen beneficios directos a los humanos (provisión recursos, asimilación de desechos, amenidades): las funciones “De” son el prerequisite para que operen las funciones “Para”.

Una definición más orientada al significado económico del concepto es la ofrecida por Huetting y Reijnders (1998), quienes relacionan el funcionamiento de los ecosistemas con la existencia de valor económico. En este sentido, las funciones ambientales son los posibles usos que los humanos pueden hacer del medioambiente bio – físico (suelo, aire, agua, plantas, animales, recursos naturales

Estos usos pueden ser directos o indirectos, y representan servicios que prestan estas funciones ambientales; y algunas funciones pueden representar bienes de consumo, otros bienes de capital.

De especial relevancia es la noción de competencia entre funciones; de tal manera que, cuando el uso de una función se hace a expensas de otra, aparece la competencia entre funciones, que las convierte en bien económico escaso (la competencia es susceptible de presentarse en tres dimensiones: Espacial, Cuantitativa, Cualitativa).

4.1.3. Posibilidades de Sustitución y Complementariedad Tecnológica

Dadas la caracterización del capital y de las funciones ambientales, pueden estudiarse las posibilidades de sustitución tecnológica entre el capital natural y el capital hecho por el hombre. Estas pueden tipificarse de la siguiente manera:

a) Sustitución entre componentes del mismo tipo de capital:

- Entre componentes del capital natural, es posible sustituir unas formas de capital natural por otras (por ejemplo, biomasa por minerales), pero en cuanto se consideran otros servicios ambientales, la posibilidad de sustitución disminuye (por ejemplo minerales por información proveniente de la Biodiversidad).
- Entre componentes del capital hecho por el hombre (por ejemplo, máquinas por trabajo, existen amplias posibilidades de sustitución.

b) Sustitución entre diferentes tipos de capital:

- Entre componentes del capital natural y componentes del capital hecho por el hombre; las posibilidades son limitadas, puesto que existen servicios singulares que sólo el capital natural puede prestar (por ejemplo, la regulación del clima global)

Puesto que el sistema económico es parte del ecosistema general, o al menos está integrado con éste, existen posibilidades de complementariedad tecnológica.

c) Complementariedad entre diferentes tipos de capital: tres tipos de argumento se han desarrollado a favor de la existencia de una complementariedad tecnológica entre el capital hecho por el hombre y el natural:

- Uno de los argumentos principales, desarrollado por autores como Herman Daly, es que históricamente estas formas de capital han sido desarrolladas como complementos y no como sustitutos perfectos; el stock de capital manufacturado ha sido creado para incrementar la productividad del capital natural (por ejemplo, tractores para hacer el suelo más fértil).
- Desde el punto de vista del proceso de producción visto a través del modelo de flujos y fondos (propuesto por Nicholas Georgescu – Roegen), puede decirse que el capital

natural es transformado por el capital hecho por el hombre en una relación complementaria.

- La relación entre los dos tipos de capital es de *interdependencia bio – física*, de tal manera que la producción de nuevo capital manufacturado requiere la utilización de más capital natural (el supuesto sustituto).

En síntesis, deben distinguirse claramente los diferentes tipos de sustitución factibles:

- a. Sustitución Directa: cuando el capital manufacturado provee un servicio equivalente al del capital natural (por ejemplo, pesticidas que cumplen los servicios que prestaban predadores naturales)
- b. Sustitución Indirecta: cuando el capital manufacturado incrementa la eficiencia del capital natural a través del “progreso técnico intensificador de la eficiencia” (por ejemplo, cuando máquinas más eficientes implican menor gasto de energía). Esta posibilidad se considera, en general, limitada
- c. Sustitución Marginal: cuando las pérdidas pequeñas en el capital natural pueden ser sustituidas por capital manufacturado (por ejemplo, una pérdida pequeña en la prestación del servicio de protección contra la radiación solar puede sustituirse con artefactos hechos por el hombre)
- d. Sustitución No Marginal: cuando la pérdida completa de un servicio provisto por el capital natural no puede ser solucionada con la provisión de capital manufacturado (por ejemplo, una pérdida total del ozono en la estratósfera).

Adicionalmente, aunque sea de difícil concreción en modelos matemáticos, para la economía ecológica es importante tener en cuenta que los factores de tiempo y espacio pueden afectar sensiblemente las posibilidades de sustitución, en concreto; puede ocurrir un cambio de escala -micro a macro económica- que determine que las posibilidades de sustitución que parecen posibles a escala de firma o sector no son posibles para la economía como un todo. Este hecho implica que los análisis de una escala micro no siempre son extrapolables a la escala macroeconómica.

Igualmente el cambio en la escala temporal es de tal importancia, que pueden existir diferencias notables entre las posibilidades de sustitución de tal manera que recursos que pueden ser reemplazados en el corto plazo no pueden serlo en el muy largo plazo (es el caso, por ejemplo, de la degradación de todos los tipos de combustible fósil).

4.2. Sostenibilidad Fuerte, Modelos De Desarrollo Sostenible Y Política Económica

Nuestra exposición de los modelos de Economía ecológica, asume una clasificación de éstos que se rige por el tipo de acepción que el concepto de sostenibilidad adopta. En ese sentido, destacamos tres clases de criterio. De un lado tenemos la sostenibilidad en el modelo de Estado estacionario y la sostenibilidad del tipo Holling, dadas sus posibilidades de ofrecer criterios “operacionales”, y por lo tanto, acercarnos a la formulación de medidas de Política Económica, del otro; tenemos un tercer tipo de modelo, relacionado con la modelación No Lineal, un tanto más alejado de la posibilidad de derivar medidas concretas de política económica.

4.2.1. Modelos De Estado Estacionario

Examinaremos el modelo de Estado Estacionario a partir de una exposición amplia en la que se muestran diferentes posibilidades de análisis de la problemática ambiental en el contexto de un modelo “Histórico” y otro “Matemático”; siguiendo, principalmente, los fundamentos del modelo de “Estado Estacionario” propuesto por Herman Daly.

Nuestro punto de partida consiste en asumir una clara cercanía conceptual entre el modelo de Estado Estacionario contemporáneo y el modelo clásico de Estado Estacionario (Por ejemplo el modelo de John Stuart Mill); lo que nos permite una exposición explícita del funcionamiento de tal economía y, de paso, discutir sus predicciones “pesimistas” acerca de la evolución del sistema económico. Finalmente, abordamos las políticas económicas ambientales que se deducen de esta visión particular de la sostenibilidad.

El término Estado Estacionario proviene de la definición hecha por John Stuart Mill, según la cual es deseable que dejen de crecer la población y el stock de capital, y ha sido empleado por Herman Daly, su principal impulsor, enriqueciéndolo con la inclusión de conceptos tales como “capital natural” y “escala” (un límite dado por la capacidad de carga de los ecosistemas).

Esta condición cumple con un propósito doble: de un lado, para criticar un estado de cosas que ha denominado “Manía del crecimiento”, representado por los modelos Neoclásicos de crecimiento económico, en los que la población y el capital crecen, mientras el sistema permanece en trayectorias de crecimiento proporcional o “Estado Estable”. Del otro, desde un punto de vista descriptivo, define un estado hipotético en el que los stocks “físicos” permanecen constantes, por lo que el crecimiento económico consistirá en incrementos en los servicios o bienes no materiales. Tal situación Implica un

proceso de reposición desde el punto de vista cuantitativo (reemplazo de stocks) que deja idéntico el tamaño (la escala) alcanzado por el sistema económico, aunque permite cambios en la calidad (esa es una acepción del término “innovación” en este marco analítico).

El “Teorema de la imposibilidad” propuesto por Daly, establece que un nivel de consumo creciente (de recursos naturales) es imposible en un mundo en el que la población crece y los recursos naturales disponibles son limitados. En consecuencia, el camino de la viabilidad económica de largo plazo consiste en promover la evolución económica en tanto que se restringe el crecimiento de los stocks y flujos de capital, materiales y energía.

La Política Económica recomendable en este caso, es la suspensión del crecimiento cuantitativo de las dimensiones físicas del sistema económico manteniendo en funcionamiento el mercado, pero cambiando el contexto institucional a través de:

1. El Control Poblacional
2. Modificaciones en la distribución del Ingreso.
3. El Establecimiento de cuotas de agotamiento para los recursos naturales.

Ante las críticas al modelo provenientes, incluso, de teóricos de la propia Economía Ecológica –como Georgescu – Roegen- , argumentando que el Estado estacionario no es el camino que garantiza la sostenibilidad, Herman Daly ha respondido que, a pesar de que la Economía en Estado Estacionario no puede durar de manera indefinida en el tiempo, tampoco pueden hacerlo una economía en crecimiento permanente, ni una en declive permanente.

4.2.1.1. El Modelo “Histórico” De Estado Estacionario

Este modelo es una formulación cercana a la versión ofrecida por el propio Daly (sugerido, por otra parte, en la Economía Como Una Nave espacial “The Economics Of The Coming Spaceship Earth” de Boulding 1966), en el sentido de asumir que el objetivo económico de la sostenibilidad es la maximización de la eficiencia de Los servicios prestados por los recursos económicos disponibles, a la vez que se minimiza el transumo o el flujo de desechos que son devueltos al medio ambiente natural.

Las magnitudes básicas que definen el modelo son:

Acervo: Inventario total de bienes materiales.

Servicio: Satisfacción experimentada por la satisfacción de necesidades, es un “ingreso psíquico”; los acervos prestan servicios.

Transflujo: flujo físico entrópico de materia y energía que proviene de fuentes naturales, es procesado por el sistema económico humano y regresa a los sumideros naturales. Desde el punto de vista energético es la materia de baja entropía requerida para prestar un servicio.

Artefactos: Acervos necesarios para ser acumulados y brindar servicios.

A partir de estas definiciones pueden obtenerse las llamadas “Razones de Eficiencia”, para evaluar la sostenibilidad:

Razón de eficiencia en servicios: $\left(\frac{\text{SERVICIOS}}{\text{ACERVO}-\text{ARTEFACTOS}} \right)$

Razón de eficiencia en mantenimiento: $\left(\frac{\text{ACERVO}}{\text{TRANSUMO}} \right)$

Razón de eficiencia económica: $\frac{\text{SERVICIO}}{\text{TRANSUMO}} = \left(\frac{\text{SERVICIO}}{\text{ACERVO}-\text{ARTEFACTOS}} \right) \left(\frac{\text{ACERVO}}{\text{TRANSUMO}} \right)$

Cuatro características pueden definir exactamente la situación deseable:

1. Una población constante de organismos humanos, esto es, que la tasa de natalidad sea igual a la tasa de mortalidad.
2. Una población constante de artefactos, lo que implica que las tasas de producción iguallen a las de depreciación.
3. La reducción al mínimo de las tasas de procesamiento de materia y energía.
4. La aplicación de medidas de de Política Económica y Social que aseguren el mantenimiento de esos niveles deseados, a largo plazo.

Una vez definidas estas características y las razones de eficiencia, es posible hacer una distinción conceptual entre los procesos de crecimiento y desarrollo económico; el crecimiento consiste en el aumento del servicio que resulta de incrementos del acervo y del transumo manteniendo constantes las razones de eficiencia, en tanto que el desarrollo es el aumento de las razones de eficiencia manteniendo constante el transumo.

A manera de conclusión, puede afirmarse que una Economía en Estado Estacionario es una economía sostenible, dado que se desarrolla, pero no crece.

4.2.1.2. Un Modelo Matemático De Estado Estacionario

Una formalización del modelo ha sido desarrollada por England (2000). Asumiendo conceptos de producción como los de “flujo” y “fondo” de Georgescu – Roegen, o los de “capital natural” propio de la economía ecológica, el modelo puede considerarse como un prototipo de modelo con sustrato bio - físico capaz de dar cuenta del tipo de economía del estado estacionario de Herman Daly, en el sentido de que modela las condiciones bajo las cuales éste puede ocurrir, a saber:

1. Escasez relativa del capital natural
2. Complementariedad general entre el capital natural y el capital hecho por el hombre
3. Agotamiento de las oportunidades de incremento de la productividad natural a través de la acumulación de conocimiento técnico.

Tomando:

L : Población humana

H : Stock de capital hecho por el hombre

K : Valor de los artefactos humanos

σ : Coeficiente de eficiencia técnica

N : Valor del capital natural

Y : Producto agregado

A, C : Coeficientes de productividad (positivos)

N : Tasa de crecimiento poblacional, constante

S : Ahorro

$\dot{\sigma}/\sigma > 0$: Tasa de innovación (positiva)

N : Stock de capital natural

B : Espacio o hábitat disponible

M : Stock de materiales y energía de baja entropía

B : Espacio

S_b : Superficie eco-sistémica

d : Densidad de espacio ocupado por los asentamientos humanos

Podemos obtener las identidades básicas:

1. Stock de capital hecho por el hombre $H = K + \sigma L, \sigma > 0$
2. Función de producción con complementariedad entre el capital natural y el capital hecho por el hombre $Y = \min [AH, CN]$

3. Escasez de capital hecho por el hombre en relación a la dotación de capital natural
 $(H/N) < (C/A)$
4. Forma específica de la función de producción $Y = AH$
5. Trayectoria de crecimiento de estado estable:

$$g_k = g_y = \left[sA + \frac{(\dot{\sigma}/\sigma + n)}{(r/\sigma + 1)} \right], \quad r = K/L$$
6. Crecimiento exponencial del ingreso: $\dot{Y}/Y = \dot{\sigma}/\sigma + n$
7. Crecimiento exponencial del ingreso per cápita: $\dot{y}/y = \dot{\sigma}/\sigma < 0$
8. Stock de capital natural: $N = N(B_1, \dots, B_m, M)$
9. Crecimiento del Stock de baja entropía: $\dot{M} = mY, m < 0$
10. Requerimiento de espacio o hábitat para especies silvestres $B_i = B_i(S_b)$
11. Variación en la superficie eco - sistémica por la que deben competir los humanos y las demás especies: $\dot{S}_b/S_b = \dot{d}/d - N = 0$
12. Densidad de espacio ocupado por los asentamientos humanos:

$$d = (L/(S - S_b))$$
13. Función de producción que supone un momento histórico a partir del cual el capital natural se vuelve relativamente escaso $Y = CN$, entonces $(H/N) > (C/A)$
14. Condición para que continúe el crecimiento económico, la cual sólo puede satisfacerse si el cambio técnico pasa de ser ahorrador de trabajo a ser ahorrador de capital natural, y si la conservación del capital natural es una prioridad social
 $\dot{c}/c - \dot{N}/N > 0.$

Por supuesto, el cumplimiento de esta condición requiere de reformas institucionales como las propugnadas por Daly y Boulding.

Vale la pena resaltar que una economía como la descrita por England, no necesariamente debe experimentar una caída súbita y definitiva en su trayectoria de crecimiento:

“estos resultados teóricos no implican necesariamente un final repentino a un crecimiento exponencial de la economía global. Más bien, uno puede ser testigo de un período transitorio en el que la productividad del trabajo y el ingreso real per cápita siguen creciendo pero a tasas de desaceleración. Si las condiciones (i) - (iii) se realizan, sin embargo, esta transición finalmente cederá a una economía global en estado estacionario”

Una vez expuestas estas variantes del modelo general de estado estacionario, analizaremos el otro criterio de carácter “operacional” en Economía Ecológica.

4.2.2. Modelos De Sostenibilidad Del Tipo Holling

El otro criterio de sostenibilidad, llamado “sostenibilidad de Holling” por haber asumido el concepto de “Resiliencia” y estar inspirado en los trabajos de C.S. Holling. Ha sido desarrollado por Charles Perrings y Mike Common. Tanto los trabajos del propio Perrings, como los de Holling muestran que si se enfoca la atención en la estabilidad de los sistemas económico y ambiental, se hace necesario pensar en indicadores no económicos para la toma de decisiones en política medioambiental.

A partir de un modelo de equilibrio general del tipo Von Neumann - Sraffa, Perrings (Perrings 1986) ha demostrado que un sistema económico en expansión genera cambios continuos y desequilibrantes en el sistema económico y el ambiental que son simultáneos.

En particular, teniendo en cuenta sólo el principio de balance de materiales, puede deducirse que el flujo de materiales entre el sistema natural y el económico produce efectos (cambios) irreversibles en el medio natural: esta es una noción de “cambio técnico incontrolado” que pone en evidencia los límites que el mecanismo de mercado tiene para controlar los efectos que induce en el medio natural.

A diferencia de la Sostenibilidad Neoclásica cuyo criterio principal es el mantenimiento del valor del capital total, la sostenibilidad del tipo Holling es un concepto de orientación bio – física, en el que los indicadores relevantes no son los incrementos o disminuciones en la

producción y el consumo, sino los indicadores de población tales como los indicadores de diversidad de las especies naturales.

Las políticas económicas genéricas propias de este modelo pretenden:

- Alcanzar niveles de regulación del nivel de actividad económica,
- El cambio estructural de las preferencias tecnológicas para evitar que los parámetros de transformación de la economía lleguen al punto de amenazar la estabilidad medioambiental.

El modelo de Perrings, parece exhibir un sesgo hacia las condiciones bio - físicas que hace aparecer como “secundarias” las condiciones económicas del problema ambiental, lo cual es natural si se desplaza el análisis desde las bases “utilitarias” hacia las “físicas”, pero resulta, indudablemente, discutible para un gran número de economistas, justamente por esta característica.

4.2.3. Modelos No Lineales Y Sostenibilidad

Este tercer tipo de modelo, muestra que existe una transición o de cierta manera una convergencia entre el análisis tradicional de la Economía Ecológica y el Análisis Económico Evolutivo.

Está caracterizado por su capacidad de incluir explícitamente el análisis de la capacidad de asimilación del medioambiente, el uso de los recursos naturales y la tecnología, empleando técnicas matemáticas de análisis No – Lineal.

El tipo de sistema descrito por este tipo de modelos hace necesario el estudio de su comportamiento dinámico a través de análisis en diagramas de fases y mediante técnicas de simulación.

Gilberto Gallopin (1994) ha tomado uno de los conceptos básicos de mayor aceptación dentro de la Economía Ecológica: La ecuación de Ehrlich y Holdren, y ha desarrollado una versión generalizada:

Dados:

I : Impacto medioambiental total

N : Tamaño de la población

C_n : Consumo Per - cápita

Tc : Impacto Medioambiental por unidad de consumo

P_n : Producción Per - Cápite

T_p : Impacto Medioambiental por unidad de producción

DA : Acciones humanas no económicas

Tenemos la Ecuación De Ehrlich – Holdren

$$I = N [C_n T_c + P_n T_p] + DA \quad (1)$$

Dados:

y : Valor de la regeneración medio ambiental (cantidad o cualidad de bienes y servicios ambientales)

B : Crecimiento Máximo o tasa de regeneración

T : Umbral de extinción

K : Asíntota superior (capacidad de carga)

La evolución del valor de la regeneración medioambiental está dada por la expresión:

$$dy/dt = B (y - T) (K - y); y > 0 \quad (2)$$

Los efectos del desarrollo económico sobre el medio natural pueden ser observados. Definiendo a I como el Impacto Medioambiental total imputable a la producción y el consumo, un impacto negativo de la economía sobre el medioambiente implica una reducción del valor medioambiental. Un impacto positivo se representa como un término aditivo en la ecuación:

$$dy/dt = B (y - T) (K - y) - I; y > 0 \quad (3)$$

El efecto de I sobre la tasa de cambio del valor medio ambiental depende de su tamaño en relación con la tasa de producción sostenible y^*

El carácter No Lineal del modelo se manifiesta especialmente cuando tenemos una situación de impacto alto de la economía humana sobre el medio natural, que lleve a éste último cerca del umbral crítico, con lo que el sistema puede experimentar una catástrofe, en el sentido matemático del término.

Otros modelos del tipo No Lineal, incluso han llevado al desarrollo de conceptos como el de "Corredores De Estabilidad".

Beckembach y Pasche usan un modelo del tipo predador-presa, con dos poblaciones interdependientes, en el que dos subsistemas (Ecológico y Socio-económico) interactúan. Su conclusión es que la evaluación de la sostenibilidad es un problema complejo, puesto que se trata del mantenimiento de sistemas que evolucionan interconectados, pero que obedecen a patrones de comportamiento diferenciados:

“Then, two conclusions for the sustainability problem can be drawn. Sustainability can neither be defined with reference to a single resource alone (or an arbitrarily chosen multitude of resources) nor by confining the analysis to ecological argument. Rather, sustainability has to deal with the whole interplay of ecological resources and economic impacts, hence with the system’s quality (in terms of variable parameters). There is no static description for resource availability. Apart from the influence of information and knowledge, this availability depends on the time path of resource extraction and of the deposition of residuals. Hence the ecological ceiling for the economy is not simply a number or an integral of a single function” (Beckenbach y Pasche 1996:280)

Esta visión del problema, en la que tenemos parámetros cambiantes en situaciones de permanente evolución, tiene implicaciones que conducen a pensar cuidadosamente en los límites que poseen las especificaciones lineales que en términos de modelización hacemos de los sistemas descritos (ecológico y económico), a la vez que ofrece una base crítica respecto de la utilización de indicadores de sostenibilidad excesivamente simplificados.

Conclusiones Y Discusión Final

Los modelos de Desarrollo sostenible propios de la Economía Ecológica contribuyen a mejorar nuestra comprensión del problema medioambiental, gracias a su eficaz integración del sustrato bio – físico a partir de conceptos como el de Balance de Materiales (relacionado con el primer principio de la Termodinámica); Escasez Energética (relacionado con el segundo principio de la termodinámica), el de capital Natural, el de complementariedad tecnológica, emparentados con nociones biológicas como las de “Resiliencia” o “Capacidad de Carga”.

Nos permiten, además, contar con descripciones o modelos positivos que contrastan con las formulaciones estándar Neo – Clásicas y enriquecen, por ello el acervo disponible de criterios de sostenibilidad del que podemos disponer los analistas y científicos preocupados por los impactos que las actividades humanas tienen sobre el medio natural.

Una de las diferencias más notorias respecto del modelo Neo - clásico de la economía ambiental, está en que la relación entre los diferentes tipos de capital que constituyen la

dotación total de la economía es –en general- de complementariedad, en tanto que la sustituibilidad factorial y tecnológica es posible, pero es muy limitada.

Un cierto consenso establecido entre autores de influencia sólida dentro de ésta sub – disciplina permite describir las políticas asociadas a la “sostenibilidad fuerte” a partir de grandes principios:

- 1.- Limitar la escala humana de acuerdo con la capacidad de carga de los ecosistemas.
- 2.- Debe existir una orientación del crecimiento tecnológico; éste deberá ser aumentador de eficiencia más que incrementador de la cantidad de productos. La utilización de instrumentos como los impuestos al uso de recursos naturales deben incentivar a las empresas y agentes económicos para alcanzar este objetivo.
- 3.- Las tasas de consumo de recursos renovables no deben exceder a las tasas de regeneración, en tanto que las emisiones de residuos no deben exceder la capacidad de asimilación medioambiental.
- 4.- Los recursos no renovables deben ser explotados a una tasa que sea igual a la tasa de creación de sustitutos renovables.

4.2.4. Los Efectos Positivos Del Cambio Técnico y La Economía Ecológica.

Como hemos podido observar a través de los modelos analizados antes, la economía ecológica posee una visión muy particular del proceso de cambio técnico: éste debe orientarse puesto que tiene efectos nocivos para el medio natural. En la propuesta de Herman Daly, por ejemplo, se habla del crecimiento económico como una verdadera anomalía (la manía del crecimiento), y el cambio técnico se restringe al ahorro o eficiencia ambientales, y se confina a la innovación orientada al ofrecimiento de servicios cualitativamente mejores, con lo que el cambio técnico tiene un sentido radicalmente diferente del tradicional. Igualmente encontramos el concepto de “Cambio Técnico Incontrolado” en el trabajo de Charles Perrings, como aquél que es capaz de inducir cambios estructurales a gran escala dentro del sistema económico, pero que igualmente provoca daños irreversibles en el eco – sistema global.

Esta particular visión del papel desempeñado por la tecnología, en la que se destacan sus efectos adversos, ha sido criticada tanto desde el punto de vista de la descripción como desde el punto de vista de las predicciones que tiene asociadas.

Son conocidas las posiciones adoptadas al respecto por teóricos del crecimiento económico, tanto desde la Economía Neo – Clásica (Solow, Stiglitz, etc) como desde la Economía Schumpeteriana (especialmente Christopher Freeman) quienes han planteado un duro debate.

Podríamos denominar a esta como una crítica “externa”, puesto que proviene de teorías económicas alternativas; pero nos interesa resaltar la existencia de una crítica “interna”, propuesta principalmente por Georgescu – Roegen, y que tiene especial interés y relevancia, sobre todo si tenemos como punto de referencia el modelo de Estado Estacionario, según el cual el desarrollo sostenible tiene sentido sólo si se entiende como *desarrollo sin crecimiento*.

Como hemos señalado antes, la propuesta de Herman Daly es clara: Desarrollo y Crecimiento económico son dos procesos diferentes, pero opuestos; en consecuencia, actualmente estaríamos practicando el crecimiento (trayectoria no sostenible) y deberíamos en el futuro, practicar el desarrollo (trayectoria sostenible). Puede resultar de interés el planteamiento de algunas dudas acerca de esta posición, primero, dentro de algunas propuestas de la propia “Economía Ecológica” y después dentro de algunos aportes hechos por la “Economía Evolutiva”.

Para empezar, podemos retomar algunas definiciones básicas aportadas por Daly (1996) en torno a la diferencia entre crecer (Aumentar naturalmente de tamaño por adición de material a través de la asimilación o el acrecentamiento), y desarrollarse (expandir o realizar potencialidades con que se cuenta; acceder gradualmente a un estado mas pleno, mayor o mejor).

Dadas estas definiciones, es pertinente preguntarse: ¿Es posible que se produzca el desarrollo Económico sin que exista el crecimiento Económico?

Si desarrollamos algunos razonamientos debidos a Nicholas Georgescu - Roegen acerca del significado del concepto de “producción”, pueden derivarse algunas críticas a la propuesta de Daly.

El proceso de evolución económica puede entenderse como una manera particular de evolución a la cual concurren elementos diversos que hacen posible la creación de una organización compleja no natural: La organización económica. El elemento representativo de ésta organización es el bien o mercancía, al constituirse como el elemento alrededor

del cual giran los consumidores, las tecnologías, los productores y los demás elementos componentes del sistema económico.

Georgescu-Roegen ha propuesto una definición del proceso de producción en la que se tienen en cuenta los efectos de principios termodinámicos. Puesto que desde el punto de vista estrictamente físico no es posible la creación de materia, el proceso que llamamos producción es, realmente, un proceso de *transformación* de la materia que pasa de un estado cualitativo a otro, es transformada por el hombre y tiene una degradación energética asociada al proceso (dados los efectos del principio de Entropía).

Entonces, dadas estas premisas, el crecimiento económico está caracterizado por:

"redistribuciones cuantitativas dentro de un espectro de bienes cualitativamente constante" (Georgescu-Roegen 1978).

Esto significa que el crecimiento económico es un proceso en el que se producen continuamente mayores cantidades de bienes nuevos, caracterizados por tener asociada una homogeneidad cualitativa. De esta definición se deduce que el desarrollo está definido como el proceso económico caracterizado por generar redistribuciones cuantitativas dentro de un espectro de bienes cualitativamente cambiante; es decir, que en el desarrollo se producen bienes cuya principal característica es la diferenciación cualitativa, es decir bienes novedosos.

De este modo, aunque los procesos de Crecimiento y Desarrollo tienen en común su capacidad de producir cantidades crecientes de bienes nuevos en el mercado, existe una diferencia sustancial entre ellos y está constituida por el hecho de que sólo en el proceso de desarrollo aparecen los bienes *auténticamente nuevos*, que representan la aparición de innovaciones tecnológicas.

En consecuencia, una distinción entre crecimiento y desarrollo según la cual el desarrollo consiste en cambio cualitativo sin que se produzca cambio cuantitativo no tiene sentido, como puede verse.

El sustrato de la teoría ofrecida por Georgescu-Roegen, el cual permite hacer esta crítica es una mezcla de la teoría Schumpeteriana de la Innovación en la que existen dos "corrientes" económicas diferenciadas ("estática" y "dinámica" o "De equilibrio" y "De Desenvolvimiento") y los principios de la Economía Ecológica; y tiene consecuencias profundas, dado que el objetivo de la sostenibilidad cambia de orientación: Las posibilidades de desarrollo del sistema económico dependerían de su capacidad para la

innovación (en el sentido Schumpeteriano del término), no en la esperanza de alcanzar un estado estacionario.

No es posible que exista el desarrollo económico sin que se produzca cierto proceso de crecimiento económico, sencillamente porque no es posible que se produzcan transformaciones radicales en las condiciones económicas (innovación) sin que aparezcan procesos de cambio acumulativo (crecimiento).

Una vez establecido que todos los procesos y productos (bienes) económicos son esencialmente transformaciones cualitativas, debemos resolver un problema adicional: debe darse una explicación al paso desde un estado de “cualidad homogénea” y reversible –propio de los bienes “normales”-, hacia un estado de “cualidad no homogénea” e irreversible –propio de las innovaciones.

La discusión acerca de la correcta definición del avance tecnológico como proceso evolutivo, ha desembocado en una interpretación de la evolución como cambio gradual y continuo (ver por ejemplo Basalla), y en segundo, la interpretación a través del cambio discontinuo o por saltos (Mokyr 1990:350; 1993:329).

De un lado encontramos a quienes consideran el desarrollo tecnológico como resultado de un proceso de pequeños pasos graduales (como se supone, de hecho, en los modelos Neo Clásicos, en los cuales se asume un comportamiento incremental del proceso analizado), y del otro tenemos a quienes asumen lo contrario y centran su explicación en el análisis de los grandes cambios.

Uno de los exponentes de ésta última posición es Joseph Schumpeter, quien privilegió a las macromutaciones como origen de la irreversibilidad tecnológica, a tal punto que les asignó la capacidad exclusiva de producir el paso desde su corriente monótona (crecimiento) hacia la corriente de desenvolvimiento. Esto llevó a Nicholas Georgescu - Roegen, a comparar la teoría evolutiva de Schumpeter con la del biólogo evolucionista Charles Goldschmidt, quién también interpretó la evolución como resultado exclusivo de las macro mutaciones (Georgescu-Roegen, 1978).

Esta tradición que considera al cambio tecnológico como proceso discontinuo por grandes saltos continuó desarrollándose en los trabajos de Georgescu-Roegen, quien subraya la correspondencia entre las macro mutaciones tecnológicas (innovaciones) y el desarrollo, por ser éstas irreversibles; y los pequeños cambios (simples mejoras a las

tecnologías existentes) al crecimiento, puesto que son potencialmente reversibles (Georgescu-Roegen 1978).

Aunque es innegable la utilidad de éste tipo de análisis, que propone la distinción clara entre los procesos novedosos y los procesos simples y los asocia, respectivamente, a las corrientes explosiva y monótona, su característica más sobresaliente es suponer aisladas a las macro mutaciones de las micro mutaciones en el proceso económico de cambio cualitativo.

Esto podría convertirse en una deficiencia teórica, como parece sugerirlo el nuevo sentido que ha adquirido la evidencia histórica. Al parecer, el desarrollo tecnológico ha sido el resultado de una interrelación compleja entre ambas clases de cambio (gradual y por saltos).

Joel Mokyr ha encontrado que existe una relación de complementariedad entre las transformaciones graduales y las transformaciones novedosas. Las macro invenciones (invenciones tecnológicas novedosas) necesitan de una acumulación de micro invenciones (invenciones tecnológicas que son simples perfeccionamientos a las invenciones precedentes) que generalmente les sirven como punto de partida, a la vez que, las micro invenciones suelen incrementarse tras la aparición de las macro invenciones (Mokyr 1993:363).

La innovación económica puede originarse en la acumulación de micro mutaciones que en determinado punto pasan de ser meros perfeccionamientos a convertirse en tecnologías novedosas. Igualmente, una macro invención repentina puede ser seguida por una ola de micro invenciones que la modifican, con lo que se presenta el desarrollo, también, por otra vía.

Uno de los elementos que permite distinguir una vía de la otra, es que en la trayectoria de cambio sorpresivo el empresario está ligado a las macro invenciones, que aparecen gracias al "genio individual", a diferencia del cambio por acumulación de micro invenciones, que es guiado solamente por los estímulos que brinda el mecanismo competitivo de precios.

4.2.5. Algunas Implicaciones Para La Modelización.

Uno de los mayores beneficios que hemos recibido de la rica tradición matemática en la economía del crecimiento es su insistencia en que cada modelo económico que se construye es, en sí mismo, una hipótesis topológica acerca del proceso económico que analiza, y por ello es susceptible de ser "matematizable".

Igualmente, se supone que el modelo matemático que se elige, para modelar, se corresponde adecuadamente con la hipótesis de comportamiento contenida en la teoría que se pretende modelar.

Es razonable pensar, entonces, que las ideas fundamentales de Innovación debidas a Schumpeter (entre otros), contienen implicaciones e hipótesis topológicas susceptibles de modelación (por ejemplo, mediante el uso de modelos matemáticos No Lineales).

La descripción aproximada del proceso es la siguiente: una economía que se encuentra inicialmente en una trayectoria suave y continua, puede salir irreversiblemente de su equilibrio, destruyendo las condiciones prevalecientes; a continuación, puede experimentar un cambio cualitativo discontinuo (un "salto") en su trayectoria, que implica una variación cualitativa radical. Este tipo de procesos de cambio económico contiene, pues, una serie de hipótesis topológicas especiales.

La hipótesis Schumpeteriana implica, en términos topológicos, que la economía abandona su estado de equilibrio y presenta un accidente cualitativo: El desarrollo.

Como ha señalado Nicholas Georgescu-Roegen, la innovación es ante todo (siguiendo a Schumpeter) un cambio de *forma*; un cambio en la fisiología del proceso económico:

"Un sistema dinámico es como un movimiento a lo largo de un camino construido por alguien en un momento que no interesa para la fisiología del sistema. En cambio las transformaciones de un sistema dinámico dado, en otro, supone un acto de creación, o sea la construcción de un camino nuevo. Algunos sistemas dinámicos pueden crecer como consecuencia de su fisiología particular. Pero el significado más nítido del "crecimiento" en economía es el paso de una fisiología a otra de mayor intensidad. Y como he sostenido en las páginas precedentes, esta operación implica un cambio cualitativo, una innovación en el sentido de Schumpeter" (Georgescu-Roegen 1978:314).

Este pasaje puede tomarse como síntesis del núcleo del problema Schumpeteriano: mostrar que el cambio evolutivo supone un salto fisiológico (cualitativo) a partir de un proceso creativo de innovaciones, teniendo en cuenta las restricciones ambientales que pesan sobre el proceso descrito. Evidentemente, los modelos que representan, en sí mismos, una hipótesis topológica que supone un cambio económico suave, gradual y continuo; no son enteramente adecuados para modelar la hipótesis de comportamiento de esta economía que puede alcanzar estados de Desequilibrio o de No Equilibrio. Así, el modelo "Schumpeteriano" de Aghion y Howitt (1990) asume que las innovaciones son simples modificaciones a los bienes intermedios que hacen más eficiente la producción de bienes de consumo (Aghion - Howitt, 1990:6). Para ellos el proceso de creación destructiva es, por tanto, un proceso suave y continuo que no representa grandes alteraciones en el proceso económico:

"An innovation need not, however, be as revolutionary as these examples, but might consist instead of a new generation of intermediate good, similar to the old one" (Aghion y Howitt, 1990:4).

Si tenemos en cuenta que los ejemplos de bienes a los que se referían estos autores son el aeroplano y el computador, resulta, por lo menos, curioso el hecho de que un modelo que se pretende Schumpeteriano, asuma que no existen las innovaciones revolucionarias (o que el aeroplano y el computador son inventos que no revolucionaron los procesos económicos), base del pensamiento de Schumpeter.

Entonces, uno de los problemas principales de la teoría de la sostenibilidad consiste en encontrar una estructura teórica que se complemente con una modelización adecuada a las características topológicas propias del proceso de cambio económico cualitativo (irreversible) que intentamos comprender.

Puede destacarse, como tendencia general que los modelos de Economía Ecológica poseen gran fortaleza cuando tratan de capturar los efectos negativos del cambio tecnológico, pero simultáneamente tienen deficiencias cuando se trata de ofrecer una explicación satisfactoria del papel positivo de las innovaciones tecnológicas. El desarrollo de modelos en los que se integran aspectos de la Economía Evolutiva con conceptos extraídos de la Economía ecológica será nuestra tarea en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V

Una Revisión Crítica De Los Modelos De Desarrollo Sostenible (III): Modelos De Economía Evolutiva

5. Una Revisión Crítica De Los Modelos De Desarrollo Sostenible (III): Modelos De Economía Evolutiva

El propósito principal de éste capítulo es estudiar las características de los modelos evolutivos de desarrollo sostenible, entendiendo por tal aquella que reconoce tanto el papel de las innovaciones radicales como el de las innovaciones acumulativas en el proceso de desarrollo económico.

Haremos una exposición de lo que se entiende por “Economía Evolutiva”; -en sentido amplio- para pasar a delimitar las teorías evolutivas que se ocupan de los procesos de crecimiento/desarrollo económico. Finalmente trataremos de explicar en detalle cuáles son las bases conceptuales de la vertiente “Neo schumpeteriana”, con el fin de establecer con precisión cuáles son las políticas económicas ambientales asociadas a éste modelo.

El Análisis Económico Evolutivo Y La Teoría Neo – Schumpeteriana

Como han señalado diversos autores, la Moderna Teoría Económica Evolutiva tiene algunos antecedentes en los trabajos de autores clásicos –por ejemplo Adam Smith-, y también entre los pioneros de la teoría neoclásica -Alfred Marshall, Carl Menger- y especialmente ha sido desarrollado por autores modernos como F. Von Hayek y Joseph Alois Schumpeter. Diversas corrientes de pensamiento han desarrollado líneas de investigación en éste sentido, abarcando una variedad muy amplia de métodos y objetivos, relacionados con tradiciones tan disímiles como las de la institucionalista (ver, por ejemplo, Hodgson 1995).

El análisis Schumpeteriano es sólo una de corrientes teóricas evolucionistas, al lado de la tradición Austríaca (a la que dio inicio Menger), la teoría del orden espontáneo defendida por Smith y Hume entre otros, el gradualismo de Marshall, el marginalismo evolucionista de Alchian, etc. Pero existe cierto consenso en el papel pionero desempeñado por Joseph A. Schumpeter, pues su trabajo se relaciona con el interés por fenómenos como el cambio tecnológico y la “creación Destructiva”.

En su libro “Historia del Análisis Económico”, en el acápite denominado “Evolucionismo”, anota:

“Los fenómenos sociales constituyen un proceso único en el tiempo histórico, y su característica más obvia es un cambio incesante e irreversible” (Schumpeter 1971:492).

La exploración metodológica de Schumpeter se completa con precisiones acerca del instrumental analítico que debe emplearse en el estudio de fenómenos evolutivos:

"El término "evolución" se puede utilizar en un sentido amplio y en otro más estricto. En el sentido más amplio comprende todos los fenómenos que hacen que un proceso económico no sea estacionario. En el sentido más estricto comprende esos fenómenos menos aquellos que pueden ser descritos mediante variaciones continuas de ritmos, tipos o tasas dentro de unos mismos e inmutados marcos institucionales, gustos y horizontes tecnológicos, que son los fenómenos que se incluyen en el concepto del crecimiento." (Schumpeter 1971:1051).

Es esta, indudablemente, una referencia directa a que sugiere una relación estrecha entre la definición de Evolución y las matemáticas adecuadas para estudiarla.

Los intentos de extensión del análisis evolutivo hacia diversos campos de la economía son, sin duda, una de las áreas que han demostrado resultados robustos; la bibliografía al respecto es amplia, y aquí nos limitaremos a mencionar algunos trabajos de manera indicativa.

En el libro Economía Evolutiva: Aplicaciones de las ideas de Schumpeter "Evolutionary Economics: Applications of Schumpeter's Ideas" de Hanusch se agrupan intentos de autores como Wolfgang Stolper y Arnold Heertje, agrupados bajo el lema: "no estamos interesados en la economía del equilibrio puro o la optimización" (Hanusch 1988). En el libro Enfoques evolutivos y neo-schumpeteriana de la Economía "Evolutionary and Neo-Schumpeterian Approaches to Economics" (Magnuson 1994), autores como Richard Nelson o Giovanni Dosi dedican esfuerzos a la construcción de una "Dinámica Neo-Schumpeteriana" del crecimiento y la innovación. Pueden encontrarse, además, variantes como la llamada Evolución Económica Artificial "Artificial Economic Evolution" en el libro Economía Evolutiva: Contribuciones Post-schumpeterianos "Evolutionary Economics: Post-Schumpeterian Contributions" (Andersen 1994), en el que se emplean herramientas de análisis algorítmico computacional (inteligencia artificial).

En general, es tan amplia la definición de teoría evolutiva Schumpeteriana que agrupa, en general a todo tipo de teorías que reconocen un papel fundamental a factores como cambio, innovación, rutinas empresariales, haciendo énfasis en el *dominio* de los procesos *dinámicos* sobre los mecanismos *estáticos* de asignación (a diferencia del análisis Neo – Clásico de Equilibrio General, por ejemplo).

Tal y como han señalado enfáticamente algunos autores paradigmáticos (Dosi, Freeman, Pérez, por ejemplo), el proceso de asignación en si mismo no es lo esencial, puesto que no son las combinaciones de factores en una determinada función de producción los que determinan las diferencias tecnológicas entre países o empresas, sino las ventajas y desventajas registradas en una determinada trayectoria de progreso técnico.

Puede afirmarse sin lugar a dudas, que la profundización en la comprensión de los mecanismos que componen el proceso innovador en sus diferentes fases es uno de los aportes fundamentales.

La innovación ha sido asumida en toda su complejidad, como la introducción al mercado de un nuevo bien, proceso, técnica, conocimiento o institución.

Como factores compartidos por los autores de la tradición Neo – Schumpeteriana contemporánea, deben mencionarse el papel clave que se otorga a los conocimientos en el proceso de desarrollo económico; en especial ha sido profundizado el estudio de las propiedades del “Conocimiento Tácito”; al igual que conceptos como los de “Frontera Tecnológica”, “Apropiabilidad”, etc.

De gran utilidad explicativa han resultado las categorías analíticas diseñadas para la descripción de los procesos de cambio económico estructural: Para Nelson y Winter, se trata de “Trayectorias Naturales”, para Giovanni Dosi de cambios de “Régimen Tecnológico”, en tanto que Carlota Pérez y Christopher Freeman han hecho énfasis en los cambios de “Paradigma Tecno – Económico”.

También son notables los grandes avances en la comprensión de los procesos de adopción tecnológica; es decir, el conjunto de decisiones de incorporación de nuevos procesos, productos o tecnologías concretas por parte de las empresas y consumidores. Autores como W. B. Arthur (1989), han elaborado conceptos comunes -Irreversibilidad Tecnológica, Rendimientos Crecientes, Lock- In, Clusters, entre otros-.

Una descripción de la taxonomía de las innovaciones, en un esquema “Mixto”, es decir, que integra tanto a las incrementales como a las radicales, puede ser la siguiente:

En primer lugar, se producen las Innovaciones Incrementales, a partir de procesos de “Learning by Doing” (Arrow) y “Learning by Using” (Rosenberg); a continuación, aparecen las Innovaciones Radicales a través de eventos discontinuos, por ejemplo a través de procesos de Investigación y Desarrollo (aparecen nuevos sistemas tecnológicos, y las innovaciones organizativas); finalmente, se producen las revoluciones tecnológicas

Cambios de Paradigma Tecno – Económico (la revolución en las industrias de la telecomunicación, por ejemplo).

Finalmente, un punto de especial interés para la economía Neo – schumpeteriana es el de la modelización adecuada de los procesos de cambio económico. Un ejemplo de este tipo de trabajos son las investigaciones del profesor Richard Goodwin, quien ha demostrado que los procesos de crecimiento por oleadas de innovación, o los de fluctuaciones cíclicas pueden estudiarse a partir de la dinámica Caótica (Goodwin 1990).

De igual manera, existe una corriente en pleno desarrollo en la que se intenta modelar el proceso innovador Schumpeteriano a partir de modelos computables de Inteligencia Artificial, o de simulación, siguiendo el camino señalado por la obra de Nelson y Winter, un ejemplo de ello es el trabajo de Esben Sloth Anderson (Anderson 1994).

El Análisis De Los Problemas Ambientales En La Economía Neo – Schumpeteriana

Tal y como ha quedado planteado en los capítulos anteriores, no sólo los análisis Neo – Schumpeterianos, sino además los de tipo Neo – Clásico y de Economía Ecológica, deben integrar metodológicamente ciertos elementos imprescindibles, cuando se trata de pensar acerca de la sostenibilidad, deben sumarse, cuando menos, dos aspectos esenciales:

1. El Reconocimiento de restricciones ambientales (por ejemplo las restricciones termodinámicas)
2. El Reconocimiento de un papel activo del cambio técnico; de la capacidad innovadora.

Algunos autores exploran la relación existente entre el cambio técnico y la sostenibilidad: su punto de partida es el reconocimiento del hecho de que los cambios tecnológicos deben orientarse de tal manera que los procesos de innovación tecnológica adopten trayectorias y paradigmas Tecno - económicos compatibles con el desarrollo sostenible, para así crear una trayectoria de desarrollo sostenible.

Claman por un cambio en el paradigma Tecno - económico (Freeman y Pérez), y las medidas de Política Económica recomendables para lograrlo serían:

- a) Limitar el uso de energía y materiales
- b) Limitar la producción de desechos
- c) Desarrollar tecnologías limpias

Teniendo en cuenta, además, que su adopción implicaría un cambio en el marco institucional y de organización de toda la sociedad.

Respecto del debate de los “Límites del Crecimiento”, el propio Freeman hace notar las deficiencias propias de cualquier modelo o teoría que no contenga una explicación satisfactoria del rol del cambio tecnológico:

“El error de los modeladores del MIT (y de algunos marxistas) fue confundir los "límites" de un paradigma de desarrollo en particular con los “límites al crecimiento” del sistema en general” (Freeman 1992: 166).

Existe un sector industrial medioambiental, que de hecho es una parte del paradigma Tecno- que prevalece, pero que es susceptible de cambios. Promoviendo cambios en Las rutinas empresariales (Nelson y Winter), en los patrones de aprendizaje y en el funcionamiento de las redes de innovación (Lahaye y Llerena 1996).

Las innovaciones son producto de procesos de aprendizaje en las firmas que están incorporados en las rutinas organizacionales, las cuales realizan la conversión del conocimiento colectivo en competencias (aprendizaje organizacional).

En cuanto a la política económica y los cambios necesarios puede señalarse que (Benhaïm y Schembri 1996):

- El gobierno debe regular la actividad económica de tal manera que influya en la dirección del proceso innovador, principalmente propiciando la cooperación entre firmas.
- Negociación Entre firmas y gobierno para cambiar las respuestas empresariales y que estas a su vez cambien la regulación.
- Aplicación de instrumentos usuales (por ejemplo impuestos por contaminación), que dirijan a las empresas hacia comportamientos de innovación favorables a la sostenibilidad.
- Subsidiar a las firmas que estén en una trayectoria tecnológica “limpia”, para que puedan permanecer en ella. Favorecer procesos de I+D “limpios”.
- Respecto de los adoptantes de tecnologías limpias: puesto que las tecnologías triunfadoras pueden ser las más perjudiciales, mejorar la información disponible para los consumidores.

En este tipo de diagnóstico, La política de crecimiento cero es inconveniente, pues los costos de oportunidad asociados son grandes (pérdidas en el nivel de ingreso, de empleo, etc).

El cambio técnico es deseable, y por lo tanto el desarrollo sostenible consiste en hacer compatibles el crecimiento económico con las restricciones medioambientales.

Se corresponde este análisis, con un énfasis en el cambio técnico como variable endógena. Las relaciones entre el proceso de desarrollo económico, el cambio técnico y el medio ambiente:

- El uso de los recursos naturales es en proceso temporal irreversible, y existe la posibilidad de que el sistema sea inviable.
- El cambio técnico puede contribuir a la sostenibilidad haciendo que las actividades económicas ejerzan menor presión sobre los recursos naturales.
- La adaptación de una trayectoria insostenible hacia otra sostenible no puede ser un proceso de ajuste instantáneo, dado que el sistema es susceptible de experimentar rigideces estructurales

Modelos De Desarrollo Sostenible Y Política Económica

5.2.1. Modelos Eco - Evolutivos

Un modelo que podríamos llamar Eco-Evolutivo ha sido diseñado por Van Den Bergh (1996). El modelo es en sí mismo una buena muestra del análisis integrado que recoge elementos propios de la economía ecológica (funciones de producción bajo condiciones de balance de materiales) y la economía evolutiva (cambio técnico endógeno).

Los autores han diseñado un modelo que permite el estudio de diferentes escenarios o trayectorias económicas, empleando técnicas de simulación para evaluar el tipo de condiciones económicas y sociales que resultan en trayectorias de desempeño sostenible o insostenible.

El modelo es multi – sectorial y considera actividades de extracción de recursos naturales, producción de mercancías, procesos de reciclaje, y de percepción social frente a los cambios en las condiciones económicas ha sido incluida.

El sistema tiene seis sectores de producción:

Sector I: Producción De Bienes Finales

Q : Producto agregado

K_Q : Capital

C_Q : (Trd) insumos de recursos naturales por unidad de producto

E : Calidad Ambiental

R_{Sup} : Disponibilidad de recursos (límite superior del nivel de producción).

$Q = \text{Min} \left\{ F_Q(K_Q, E), \frac{R_{Sup}}{C_Q(T_{rd})} \right\}, \frac{dC_Q}{dt} < 0$ El cambio técnico es eficiente en la disminución de los recursos naturales necesarios para llevar a cabo la producción.

Sector II: Producción De Bienes De Inversión

I : Inversión

$$I = \text{Min} \left\{ F_I(K_I), \frac{R_{Sup} - C_Q(T_{rd}) * Q}{C_I(T_{rd})} \right\}$$

Sector III: Tratamiento De Desechos

Los residuos no son arrojados directamente al medio natural

R_{wa} : Residuos Tratados.

$W_{Q,I}$: Emisión de Residuos - Residuos provenientes de los procesos de producción

f_{wa} : Coeficiente de efectividad del proceso de tratamiento de residuos

$$R_{wa} = f_{wa}(T_{rd}K_{wa}) * W_{Q,I}$$

Sector IV: Actividades De Reciclaje

El flujo de desechos susceptible de ser reciclado está determinado por factores como la tecnología

$$R_{rec} = f_{rec}(T_{rd}, K_{rec}) * W_{rec}$$

La disponibilidad de recursos naturales de buena calidad y en las cantidades requeridas viene dada por:

Sector V: Extracción De Recursos Naturales Renovables

$$R_N = \text{Min}\{F_N(K_N, N, E)R_{N,perc}\}$$

Sector VI: Extracción De Recursos Naturales No Renovables

$$R_S = \text{Min}\{F_S(K_S, S)R_{S,perc}\}$$

Evolución Dinámica:

Cambio en el stock de capital

$D_i(K_i)$ Tasa de depreciación

$$\frac{dK_i}{dt} = I_i - D_i(K_i)$$

Progreso Tecnológico:

Definido como un proceso de retroalimentación

e_e : Feedback de desarrollo sostenible

O_{rd} : Soporte gubernamental para procesos de I+D

dZ/dt : Efecto Kaldor – Verdoorn

$$\frac{dT_{rd}}{dt} = \alpha(e_e) * I + E(e_e) * \left[O_{rd} + \delta * \frac{dZ}{dt} \right]$$

Cambio Poblacional:

C : Consumo

Pop : Tamaño de la población

$$\frac{dPop}{dt} = B\left(\frac{C}{Pop}\right)Pop$$

Cambio en el Stock de Residuos Que No Pueden Ser Reutilizados:

$$\frac{dS_{wa}}{dt} = S_1 * R_{wa} + S_2 * (W_{rec} - R_{rec})$$

Sistema Ecológico:

Cumple funciones de regeneración, asimilación de la contaminación, oferta de recursos naturales, y es susceptible de perturbaciones negativas si los niveles de polución o de agotamiento de recursos se incrementan.

E : Medioambiente

N : Recursos Bióticos

B : Recursos Semi – Renovables (suelo)

P : Asimilación de la Polución

A : Asimilación natural

$$E = H(N, B, P)$$

$$\frac{dN}{dt} = G(N, E) - R_N$$

$$\frac{dP}{dt} = -A(P, E) + W_{CM}$$

$$\frac{dB}{dt} = \left[b_1(E) - b_2 \left(\frac{dK}{dt} \right) - b_3 \left(\frac{dPop}{dt} \right) - b_4(R_N) b_5(R_S) \right] + B$$

$$\frac{dS}{dt} = -R_S$$

Condiciones De Balance De Materiales:

La emisión de residuos o producción agregada de basuras debe ser igual a la cantidad de insumos menos la cantidad de productos:

$$W_{Q,I} = [C_Q(T_{rd}) - 1] * Q + [C_I(T_{rd}) - 1] * I$$

La demanda por recursos naturales adicionales es igual a la cantidad de insumos requeridos para la producción menos los recursos y materiales sometidos a procesos de reciclaje.

$$R_{new} = C_Q(T_{rd}) * F_Q(K_Q, E) + C_I(T_{rd}) * F_I(K_I) - R_{rec}$$

Feedback De Desarrollo Sostenible:

Posibilidades de ajuste a la trayectoria adoptada por el sistema económico, consideradas como metas sociales de equidad intergeneracional y mantenimiento de los niveles de calidad ambiental aceptables, además de las cantidades de recursos naturales adecuadas.

Las valoraciones sociales y las consideraciones ecológicas se incluyen en tres indicadores:

$R_{N,perc}$:	Nivel aceptable de recursos naturales Renovables
$R_{S,perc}$:	Nivel aceptable de recursos naturales No Renovables
R_{perc} :	Nivel aceptable de Extracción total
D :	Variable Dummy que toma valor 0 (Uso sostenible) y 1 (Uso "Flexible")

Feedback De Valoración Social:

$$R_{N,perc} = \text{Max}\{0, d * P_N * N + (1 - d) * G(N, E)\}$$

Feedback De Recursos Naturales:

$$R_{short} = \text{Min}\left\{1, \frac{R_{perc}}{R_{perc}}\right\}$$

Los autores realizaron simulaciones en 10 Escenarios diferentes, tomando como referencia una trayectoria base, una situación en la que la economía es estacionaria, no hay cambios en el stock de capital, no hay desequilibrios entre oferta y demanda de recursos naturales y la preocupación social por la sostenibilidad es la máxima posible.

Escenarios:

- Sin Preocupación Ambiental
- Crecimiento moderado, fuerte y extremo, crecimiento extremo y sostenibilidad

El sistema es sensible a las condiciones iniciales (por ejemplo a los stocks iniciales de recursos naturales) es no lineal.

Las precauciones sociales no conllevan necesariamente declive económico, en cambio pueden prevenirlo.

5.2.2. Un Modelo Neo Austriaco

El proceso económico, visto a través del análisis Neo Austriaco, se caracteriza por tener una estructura temporal en la que los procesos de producción son secuenciales. La extensión de los modelos básicos hacia la consideración explícita de los problemas ambientales en este tipo de modelos se debe principalmente a los trabajos de Malte Faber y John Proops (1990).

Tenemos exposición que obedece a tipo sostenibilidad, hay varias definiciones por ejemplo el modelo Amendola y otros autores:

“Lidiar adecuadamente con el problema de la sostenibilidad requiere un cambio total de perspectiva analítica; es decir, centrarse en los procesos de cambio económico interpretándolos como procesos creativos y no como procesos de asignación derivados de la elección” (Amendola et al.1996:176)

Modelo en la tradición Neo – Austriaca, con procesos de producción secuenciales, con lo que se incorpora explícitamente la dimensión temporal de la producción.

El producto agregado de ésta economía se obtiene a partir de dos recursos; energía y trabajo -insumos primarios-.

Vectores de Producción

Es posible distinguir fases en el proceso de producción. La fase de construcción que va de 0 a n y la de utilización que va de $n + 1$ a $n + N$.

Cantidades de recursos –trabajo y energía- necesarias:

$a^c = [a_0, a_1, \dots, a_n]$ Trabajo - Fase De Construcción

$a^u = [a_{n+1}, a_{n+2}, \dots, a_{n+N}]$ Trabajo - Fase de Utilización

$e^c = [e_0, e_1, \dots, e_n]$ Energía- Fase De Construcción

$e^u = [e_{n+1}, \dots, e_{n+N}]$ Energía - Fase De Utilización

$b^c = [b_{n+1}, \dots, b_{n+N}]$ Cantidades de Producto final – Fase De Utilización

Un vector de procesos de producción X con su correspondiente duración temporal (edad):

$$X(t) = [X_0(t), X_1(t), \dots, X_{n+N}(t)]$$

Cantidad de Procesos de Producción:

Teniendo en cuenta que existen procesos descartados U_j y procesos nuevos U_0

$$X_j(t) = \bar{X}_j(t) - U_j(t) \quad j = 1, \dots, n + N$$
$$X_0(t) = U_0(t)$$

Dependiendo del nivel de actividad económica, pueden presentarse variaciones, de tal manera que pueden identificarse umbrales a partir de los cuales se presentan saltos en el comportamiento de este precio

Cambios en el precio del recurso Energético:

$$p_e(t) = p_e(0)[1 + \delta(t)]$$

Tanto la magnitud, como la velocidad del cambio en el precio, pueden ser captadas a través de la siguiente expresión:

δ = Magnitud

δ_2 = Cambio

g_x = Tasa de crecimiento de X

La magnitud de ese cambio:

$$\delta(t) = \delta_0 g_x(t-1) + \delta_1 [\tanh(\delta_2 g_x(t-1) - 1) - \tanh(-\delta_2)]$$

Demanda Total

$$d(t) = \frac{y(t)}{p(t)}$$

Oferta Total

$$s(t) = \frac{m * (t)}{p(t)}$$

Producción Total

$$q(t) = s(t) - \eta_0(t-1)$$

Inversión total

$$i(t) = w(t) - w^u(t)$$

Con w , salarios

Parte del fondo de salarios se gasta en la fase de utilización:

$$w^u(t) = w(t)a^u(t)X^u(t)$$

Nivel de Empleo Total

$$E(t) = a^u X^u(t) + a^c X^a(t)$$

Este sistema permite realizar simulaciones en un sistema económico que parte de una situación de estado estable y experimenta un shock en el precio del recurso energético, lo que trae –como consecuencia- cambios en la estructura de la producción.

Si el sistema económico está fuera de sus condiciones de equilibrio, y experimenta restricciones en la disponibilidad del recurso energético, o sufre un shock de precios, exhibe trayectorias en las que ocurren procesos de innovación -entendidos como adaptación a las nuevas condiciones económicas y medioambientales-.

- Si la economía está en un estado estable, tiene restricción del Recurso natural, y el precio del recurso natural (energía) sufre un cambio fuerte, la tasa de crecimiento exhibe fluctuaciones, pero es capaz de retornar al estado estable, o aun “cuasi estado estable”.
- Si la economía está en desequilibrio (oferta y demanda no son iguales en su secuencia temporal), y se presenta un shock en el precio del recurso natural, tenemos dos opciones:
 - a) Si no existe restricción del recurso natural: los desequilibrios pueden aliviarse si existe la posibilidad de traer recursos (trabajo o energía) de fuera del sistema,
 - b) Si existe restricción del recurso natural, se presenta un exceso de capacidad productiva sobre la demanda agregada, y la tasa de crecimiento fluctúa. Los cambios o distorsiones en la estructura productiva, provocan que el sistema económico sea inviable por un período de tiempo largo.

Dos conclusiones deben resaltarse -en el caso en que pueden suministrarse a la economía recursos (trabajo-energía) adicionales-:

Si el único límite al crecimiento es la disponibilidad del recurso natural, la economía puede ser viable y es posible que alcance su trayectoria óptima.

Los límites al crecimiento pueden presentarse debido a fallos en la sincronización de las fases productivas –es decir, en el funcionamiento interno de la economía- más que en la restricción ambiental, y la política económica adecuada (ajustes en los factores productivos y en la demanda final, a las velocidades adecuadas) será necesaria para intentar alcanzar la viabilidad.

Conclusiones

Respecto de nuestra discusión acerca de la caracterización del capital natural, es importante resaltar que las funciones relacionadas con las posibilidades de obtener conocimiento tecnológico del capital natural, se relacionan principalmente con las funciones de producción (recursos genéticos, recursos medicinales, por ejemplo) y las funciones de información (inspiración artística y cultural, información científica y educativa, por ejemplo).

Las políticas de inversión en capital natural, tal como se define por la economía ecológica, y las de mantenimiento, estarían, pues, relacionadas con el estímulo a la provisión de recursos básicos de producción e información útil para el proceso económico.

Nuestro punto es que es necesario avanzar y plantear que una de las funciones del capital natural es proveer su conocimiento (el conocimiento generado en sí mismo) y el aprendizaje, útil para el proceso innovador humano.

Podemos, ahora, resaltar algunas conclusiones, una vez que hemos examinado cuidadosamente algunas de las alternativas más relevantes y representativas, provenientes de la economía ecológica, la economía ambiental y la economía evolutiva.

Muchos de los modelos matemáticos que son útiles para el análisis de la sostenibilidad tienen un sesgo hacia la definición “física” del capital natural, es decir, a partir de stocks materiales (de recursos naturales renovables y no renovables).

Si bien es cierto que es posible encontrar definiciones amplias (pero muchas veces no aplicadas a modelos) que reconocen el papel de los ecosistemas como proveedores de servicios ambientales, en general, puede decirse que, desde el punto de vista del objetivo de construir una caracterización adecuada del concepto “capital natural”, la debilidad principal de las alternativas existentes es la sub - valoración de las posibilidades de generación de conocimiento y procesos de aprendizaje propios del capital natural, a la vez que su fortaleza es una creciente tendencia al reconocimiento del carácter complejo (de interacciones amplias, de interdependencia) del capital natural.

El hecho de que, a partir del esfuerzo colectivo de escuelas de pensamiento diversas, se haya refinado el concepto de capital natural, haciéndolo más manejable y reconocible para el análisis económico, es hasta cierto punto una consecuencia lógica, esperable después de décadas de trabajo en el campo de la economía de los recursos naturales y del desarrollo sostenible, para cualquier observador que crea en el carácter esencialmente progresivo y acumulativo del conocimiento científico.

Una simplificación excesiva del concepto de capital natural puede impedir el reconocimiento de su relación con la innovación. Existen, pues, algunas oportunidades importantes de mejora en nuestra comprensión del papel desempeñado por los recursos naturales en el proceso de desarrollo económico y también para el logro del objetivo de sostenibilidad. Para empezar, puede resultar de utilidad la revisión de algunos trabajos pioneros en el ejercicio de reconocer la contribución de los stocks y flujos tecnológicos naturales.

CAPÍTULO VI

El Aprendizaje Del Capital Natural: Antecedentes Y Desarrollos Teóricos

6. El Aprendizaje Del Capital Natural: Antecedentes Y Desarrollos Teóricos

Después de las conclusiones y discusiones presentadas en los capítulos precedentes, podemos afirmar que buena parte de los instrumentos analíticos que son necesarios para la formulación de Políticas Económicas útiles para la resolución de los problemas medio ambientales, dependen sensiblemente de la definición que se haga del “Capital Natural”.

Puede afirmarse que algunos aspectos de la mayor importancia en la explicación del crecimiento económico (y en el diseño de soluciones para los problemas medioambientales) tales como la sustitución tecnológica, dependen sensiblemente de la definición explícita o implícita que se tenga del capital natural.

En general contamos con dos clases de supuestos al respecto: de una parte (como se hace usualmente en los modelos neoclásicos de desarrollo sostenible) puede asumirse que el capital natural es un agregado de inputs de recursos naturales, lo que nos conduce en la mayoría de los casos a suponer un grado de sustitución entre factores alto. De otra, puede asumirse que el capital natural está compuesto por un conjunto de ecosistemas (como suele hacerse en los modelos de Economía Ecológica) lo que, generalmente, conduce a suponer un grado de sustitución muy bajo (o a suponer la complementariedad de los factores de producción). De ahí que deba darse especial importancia al diseño y especificación que puedan hacerse de éste concepto.

En este capítulo, sostendremos que existe un hecho económico fundamental que no ha sido suficientemente analizado por gran parte de los modelos y teorías de Desarrollo Sostenible que hemos revisado: la relación existente entre el capital natural y el proceso de innovación económica, a través de la producción de técnicas y productos de origen natural susceptibles de aprovechamiento tecnológico y económico. Como veremos, el capital natural es una valiosa (y en muchos casos, imprescindible) fuente de información, de aprendizaje y de conocimientos de naturaleza tecnológica que pueden ser aprovechados (y de hecho lo son) por el sistema económico.

Esta línea de razonamientos conduce a plantear de una manera diferente el papel de los ecosistemas naturales, puesto que implica que deben ser considerados como una fuente de innovación tecnológica, y ello implica asumir que los ecosistemas, que la naturaleza son –de alguna manera- agentes susceptibles de contribuir, inspirar, o producir innovaciones tecnológicas. En consecuencia, puede decirse que, en general, hemos estado subestimando algunas propiedades básicas del capital natural si sólo lo

consideramos como colección de inputs o como proveedor de funciones ambientales: el capital natural es una fuente de progreso tecnológico y contribuye a mejorar el desempeño del sistema económico. De manera simétrica, es muy probable que estemos subestimando las pérdidas económicas derivadas de la destrucción de los ecosistemas naturales terrestres.

La consideración de los ecosistemas como agente de innovación, saca a la luz, por tanto “magnitudes” económicas ocultas. De una parte, tenemos las ganancias tecnológicas que conlleva la interacción del hombre con su entorno natural –por ejemplo mediante el aprovechamiento de las innovaciones naturales; de otra parte, tenemos las pérdidas – entre ellas las tecnológicas- que implica la destrucción de la diversidad natural. Además revela problemas de especificación en los modelos de Desarrollo Sostenible que intentan describir y analizar el curso probable de la economía sin la inclusión de éstas “ganancias” y “pérdidas” (lo que puede conducir, claro está, a predicciones imprecisas).

Este capítulo plantea la existencia de los “Naturfactos (tecnologías naturales), y sus posibilidades de aprovechamiento por el sistema económico. Como veremos, la constatación de la existencia de los “Naturfactos” y el estudio de la historia de su relación con la tecnología humana nos ofrecen una oportunidad para el análisis de algunas de las debilidades y las fortalezas propias de las diversas maneras de definir al capital natural. El desarrollo de conceptos como el de “Tecnologías Naturales” es fundamental para la presentación de una argumentación sólida que permite mostrar algunos fallos cruciales en la concepción que hacen del desarrollo sostenible (y, por tanto, de las políticas económicas propuestas) los modelos que hemos reseñado y caracterizado en los capítulos precedentes, a la vez que es un buen punto de partida para sostener que es importante asumir que el capital natural es una fuente de innovación.

En cuanto a la definición adecuada del capital natural, nuestra pregunta fundamental puede plantearse del siguiente modo: ¿las definiciones más influyentes con las que contamos para analizar la sostenibilidad son lo suficientemente amplias como para reconocer que el capital natural es una fuente de avance tecnológico?

Los apartados siguientes, pretender consolidar una reflexión acerca de la correcta caracterización económica de las tecnologías, bienes y servicios naturales, a través de ejemplos que muestran múltiples posibilidades de interacción entre éstas y las tecnologías de origen humano. Igualmente, se exponen conceptos que, desde el punto de vista de análisis propiamente económicos, nos acercan a la conceptualización apropiada del fenómeno de aprendizaje desde el capital natural.

Los naturfactos: tecnologías naturales al servicio de La economía humana

En este capítulo, dedicaremos nuestros esfuerzos a la construcción de conceptos que nos permitan esclarecer el papel desempeñado por uno de los componentes del proceso de innovación que usualmente ha sido soslayado – a pesar de ser importante- al cual denominaremos "Aprendizaje del Capital Natural".

En la actualidad existe una intensa reflexión alrededor de la importancia que tiene la naturaleza como fuente de innovación humana, en disciplinas científicas diferentes de la economía tales como la física, la ingeniería, la biomecánica, la biología, la química (entre otras) la cual no tiene –aún- contrapartida al interior de la disciplina económica. Dicha reflexión tiene como motivación esencial el análisis de tecnologías, bienes y servicios que tiene como factor común el uso de la naturaleza como fuente de inspiración, como referente para el diseño, o como insumo tecnológico: desde productos y tecnologías ampliamente conocidos tales como el Velcro®, o el aeroplano moderno, pasando por el tren bala japonés Shinkansen, la Pintura Lotusan®, el sistema de embalaje biodegradable a base de hongos Mycobond®, un conjunto de medicamentos como Zocor® (Simvastatina, Medicamento para el control del colesterol), Byetta® (Medicamento inyectable para el control de diabetes mellitus tipo 2), o el Agente Anticancerígeno Yondelis® (Trabectedina).

Estas tecnologías han impactado áreas tales como la generación de energía (las Turbinas de viento Whalepower®), la arquitectura (el Edificio Eastgate Centre en Harare-Zimbawe o la arquitectura de Gaudí), entre muchos otros, los cuales han sido reseñados en diversos estudios en los que se presentan y describen las tecnologías humanas basadas en tecnologías naturales correspondientes a una gran diversidad de campos tales como la robótica, la nanotecnología, la medicina, los nuevos materiales, la microelectrónica, la arquitectura, la biomecánica, la biorremediación, los biopolímeros, la cibernética, la inteligencia artificial (Bar-Cohen 2006, National Academy of Engineering 2007, Bhushan 2009, Von Gleich et al. 2009, Carpi y Brebbia 2010, Martin 2011, Reed et al. 2009; entre otros).

Este proceso de interdependencia entre tecnologías existentes en la naturaleza y tecnologías humanas consiste, básicamente, en la transferencia de información, principios naturales, o materiales, para crear productos, servicios o tecnologías, aprovechando la capacidad que tienen los sistemas biológicos, los ecosistemas, de llevar a cabo funciones muy complejas con resultados óptimos. El estudio sistemático del funcionamiento de estos sistemas biológicos por parte de científicos en distintas disciplinas y de las posibilidades de adaptación de ideas, principios y características que rigen las tecnologías

naturales, ha dado origen a un vasto conjunto de bienes, servicios y tecnologías basadas en la naturaleza como modelo o fuente de innovación. La interacción entre tecnologías provenientes de la naturaleza y los procesos productivos ha recibido, en general, la denominación de “biomimética”, como campo de carácter amplio que incluye diversas denominaciones relacionadas (bioinspiración, biomimesis, biónica, entre otras). Como campo de investigación, la biomimética está experimentando un auge representado por su rápido crecimiento en las últimas décadas. El análisis bibliométrico de Lepora et al. (2013) muestra que esta área de investigación ha duplicado su tamaño cada 2-3 años desde mediados de los noventa y ha producido casi 3000 publicaciones por año. Adicionalmente, el aporte a la innovación tecnológica de la biomimética también es creciente: la revisión hecha por Bonser (2006) de las patentes de la Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos en el periodo de 1985 a 2005 encontró que el número de patentes que se basan en fundamentos biomiméticos han crecido, en términos proporcionales, más rápido que el número total de patentes. En la misma línea, el estudio de Von Gleich et al. (2009: 117) muestra que a los países que lideran las aplicaciones de patentes en este campo son los Estados Unidos de Norteamérica, Japón, China y Alemania.

Las innovaciones humanas (bienes, servicios y tecnologías) que se basan en la transferencia de ideas, procesos, estrategias, materiales, tecnologías provenientes de los sistemas biológicos, se producen a través de diferentes tipos de procedimientos, que pueden asumirse como modalidades diferentes de apropiación humana (bioinspiración, biomimética, bioextracción, bioderivación, bio-asistencia, entre otros) sobre los cuáles surgen algunos interrogantes relevantes. En tal sentido, vale la pena preguntarse acerca de la diferenciación entre estas modalidades, lo cual nos conduce a la necesidad de contar con definiciones precisas y una delimitación que permita comprender los diversos grados de dependencia que las tecnologías humanas tienen respecto de las tecnologías naturales. Respecto de las definiciones precisas, aparecen con el aporte de Otto Schmitt en el año de 1969, quien acuñó el término biomimética integrando los conceptos de “bios”, que significa vida, y “mimesis”, que significa imitar (Schmitt 1969), y continúan con una larga lista de aportes, de los cuales se reseñan algunos de los más relevantes con fines de permitir una comparación, en la tabla 7. En ella, se puede constatar la equivalencia entre las nociones de biónica y biomimética y la gran similitud de éstos con las definiciones correspondientes a la bioinspiración.

Las dificultades que entrañan los intentos de diferenciación clara entre los conceptos de bioinspiración, biomimética y los demás conceptos relacionados, se reflejan con precisión por Hank y Swiegers:

“La distinción entre la biomimética y la bioinspiración no es, sin embargo, tajante. Existen muchos tonos de solapamiento entre estos dos conceptos. Por ejemplo, una imitación deliberada y sistemática de las técnicas empleadas por la naturaleza dentro de los sistemas que están muy lejos de la naturaleza puede ser considerada ya sea biomimética o bioinspiración... la distinción formal entre la biomimética y la bioinspiración por lo tanto, pueden estar difuminadas y llegar a ser difícil de separar” (Hanks y Swiegers 2012: 2).

Las motivaciones para la unificación de éstos conceptos han sido expuestas por autores como Vincent et al. (2006), Lepora et al. (2013), Rawlings et al. (2012) y Drack y Gebeshuber (2013). Algunas de las modalidades estrechamente relacionadas con la biomimética suelen solaparse y pueden ser fácilmente confundidas, especialmente cuando se abordan las innovaciones asociadas con el aprovechamiento de individuos, poblaciones, materiales, principios activos y sustancias naturales (relacionados al final de la tabla 9) con las nociones de bioderivación, bioadaptación, bioasistencia, bioextracción y bioutilización. El campo más comprehensivo, más amplio, es el de la bioinspiración, la cual consiste en obtener influencia o información desde fuentes naturales para crear bienes, servicios, tecnologías, procesos; tal vez es el más difícil de definir con precisión puesto que tiene una superposición muy amplia con la biomimética. Algunos autores señalan que la amplitud de la definición del concepto, indicaría que la biomimética estaría incluida en el concepto más general de bioinspiración, con lo cual la biomimética sería es un caso especial de la bioinspiración en el sentido de que el desarrollo de todo producto biomimético (transferencia) requiere previamente de un proceso de bioinspiración (influencia, información). De otra parte, la bioutilización, la cual consiste –para efectos de este trabajo- en el aprovechamiento de un componente natural (dicho componente natural puede consistir en una molécula, una sustancia, un material, un organismo o población, o una función ecosistémica) con el propósito de integrarlo de manera funcional en una tecnología, bien o servicio desarrollado por los humanos, puede agrupar las nociones de bioderivación, bioadaptación, bioasistencia y bioextracción, puesto que cada uno de éstos representa una forma específica de incorporación de un elemento natural en bienes, servicios o tecnologías humanas.

Tabla 7. Biomimética, bioinspiración, bioutilización y definiciones relacionadas.

AUTOR(ES) / AÑO	DEFINICIÓN	FUENTE
J. E. Steele / 1958–60	"La biónica explora sistemas cuyas funciones son modeladas a partir de los sistemas naturales, o cuyas propiedades se asemejan a las de los sistemas naturales, o son análogas a ellos "	Gérardin (1972, 11)
L. P. Kraismer / 1967[publi cación inicial 1962]	"La biónica es, pues, la ciencia que investiga los procesos y métodos biológicos con el propósito de aplicar los resultados al mejoramiento de las máquinas y sistemas antiguos para crear máquinas y sistemas más novedosos. También podría decir que se trata de la ciencia de los sistemas que demuestran características similares a las de los organismos vivos".	Kraismer (1967, 12)
J. F. V. Vincent et al. / 2006	"La biomimética (la cual debe entenderse como sinónimo de 'biomimesis,' 'Biomimetismo' biónica ", " biognosis, "diseño inspirado biológicamente, y "palabras o frases similares que implican la copia, adaptación o derivación desde la biología) es un estudio relativamente reciente dedicado al uso práctico de mecanismos y funciones de la ciencia biológica en la ingeniería, el diseño, la química, la electrónica, entre otras".	Vincent et al. (2006, 471)
Y. Bar- Cohen / 2006	"La biónica es el término para designar al campo de estudio que involucra copiar, imitar y aprender de la biología ... el término biomimética en sí mismo se deriva de bios, que significa vida, y mimesis, que significa imitar. Esta nueva ciencia representa el estudio y la imitación de los métodos, diseños y procesos de la naturaleza. Si bien algunas de sus configuraciones básicas y los diseños pueden ser copiados, muchas ideas de la naturaleza están mejor adaptadas cuando sirven como inspiración para las capacidades hechas por los humanos".	Bar-Cohe n (2006, 2)
Von Gleich et al. /2009	"La biomimética es el intento de aprender de la naturaleza; se trata del desarrollo de innovaciones sobre la base de la investigación estructuras, funciones, procesos y sistemas biológicos optimizados evolutivamente".	Von Gleich et al. (2009, 18)
Rawlings et al. /2012	"[La biomimética] El estudio y desarrollo de los sistemas sintéticos que imitan la formación, función, o estructura de sustancias producidas biológicamente, materiales, mecanismos y procesos biológicos"	Rawlings et al. (2012, 6675)

Continúa en la página siguiente

AUTOR(ES) / AÑO	DEFINICIÓN	FUENTE
Benyus/ 1998	"Naturaleza como modelo: La biomimicry es una nueva ciencia que estudia los modelos de la naturaleza y luego imita o toma inspiración de esos diseños o procesos para resolver problemas humanos, por ejemplo la celda solar inspirada por una hoja. Naturaleza como medida: la biomimicry usa un estándar ecológico para juzgar la rectitud de nuestras innovaciones tras 3,8 billones de años de evolución la naturaleza ha aprendido: que es lo que funciona. Lo que es apropiado. Lo que es perdurable. Naturaleza como mentor: es una nueva manera de observar y valorar a la naturaleza. Nos introduce en una era basada no en lo que podemos extraer del mundo natural, sino en lo que podemos aprender de él"... "La emulación consciente del genio de la vida, innovación inspirada por la naturaleza"	Benyus (2002,2)
Hank y Swieger /2012	"La bioinspiración se describe como la comprensión de los aspectos fundamentales de alguna actividad biológica y luego reconstruirlo de otra manera. Consideremos el programa de investigación de los hermanos Wright, en el cual la elevación, el control, y la propulsión fueron todos aceptados como elementos de vuelo de las aves. Los dos primeros elementos fueron recreados en forma similares a los que tienen el contorno y la curvatura del ala (de las aves), mientras que el último (la propulsión) fue completamente reemplazado por una hélice impulsada por un motor impulsado. Es ilustrativo que la propulsión se generó usando medios muy diferentes".	Hank y Swieger (2012, 2)
Committe on Bio- molecular Materials and Processes National Research Council / 2009	"Bioinspiración. Simplemente conociendo que una tarea puede realizarla un sistema vivo, puede inspirar a los científicos a desarrollar un sistema sintético que lleve a cabo la misma función, incluso si el sistema utiliza un esquema sintético bastante diferente del empleado por el sistema biológico."	Committe on Bio- molecular Materials and Processes , National Research Council (2008, 19)
Rawlings et al. /2012	"La bioinspiración consiste en obtener influencia o información de lo natural para crear procesos o productos"	Rawlings et al. (2012,667 6)

Continúa en la página siguiente

AUTOR(ES) / AÑO	DEFINICIÓN	FUENTE
Hank y Swieger /2012	"... el uso directo de materiales naturales; lo denominaremos bioutilización. Cuando el componente natural de interés es cosechado y diluido para nuestros propósitos humanos, tal como ocurre con los productos naturales que son usados en productos farmacéuticos, lo denominamos bioextracción... Los materiales bioderivados son el resultado de la modificación de la oferta de la naturaleza para proporcionar un desempeño mejorado".	Hank y Swieger (2012, 5)
Sam Harrington/ 2012	"La Bio-adaptación es alinear el propósito fundamental de un organismo para satisfacer una necesidad real de las personas en este planeta. La agricultura es un ejemplo de Bio-adaptación".	Hummels (2012,116)
Benyus/2006	"Cosechar se refiere a la utilización de los materiales proporcionados por la naturaleza - planta o animal - sin la intervención humana en el proceso de producción en sí. Esto también se conoce como Bio-Utilización"	The natural Edge Project (2007, 83)

Fuente: Elaboración del autor basada en Von Gleich et al. (2009)

En lo que respecta a la disciplina económica, el proceso de transferencia de tecnologías o conocimientos útiles para mejorar la productividad y la innovación ha sido abordado por el historiador de la tecnología y la innovación George Basalla, quien propone como punto de partida el hecho evolutivo de que existen artefactos -un producto humano- cuyos antecesores no fueron fabricados por otro ser humano, a los cuales denomina "Naturfactos", en referencia a bienes económicos originados en tecnologías naturales, las cuales sirven de antecesor evolutivo, de referente a bienes y tecnologías humanas:

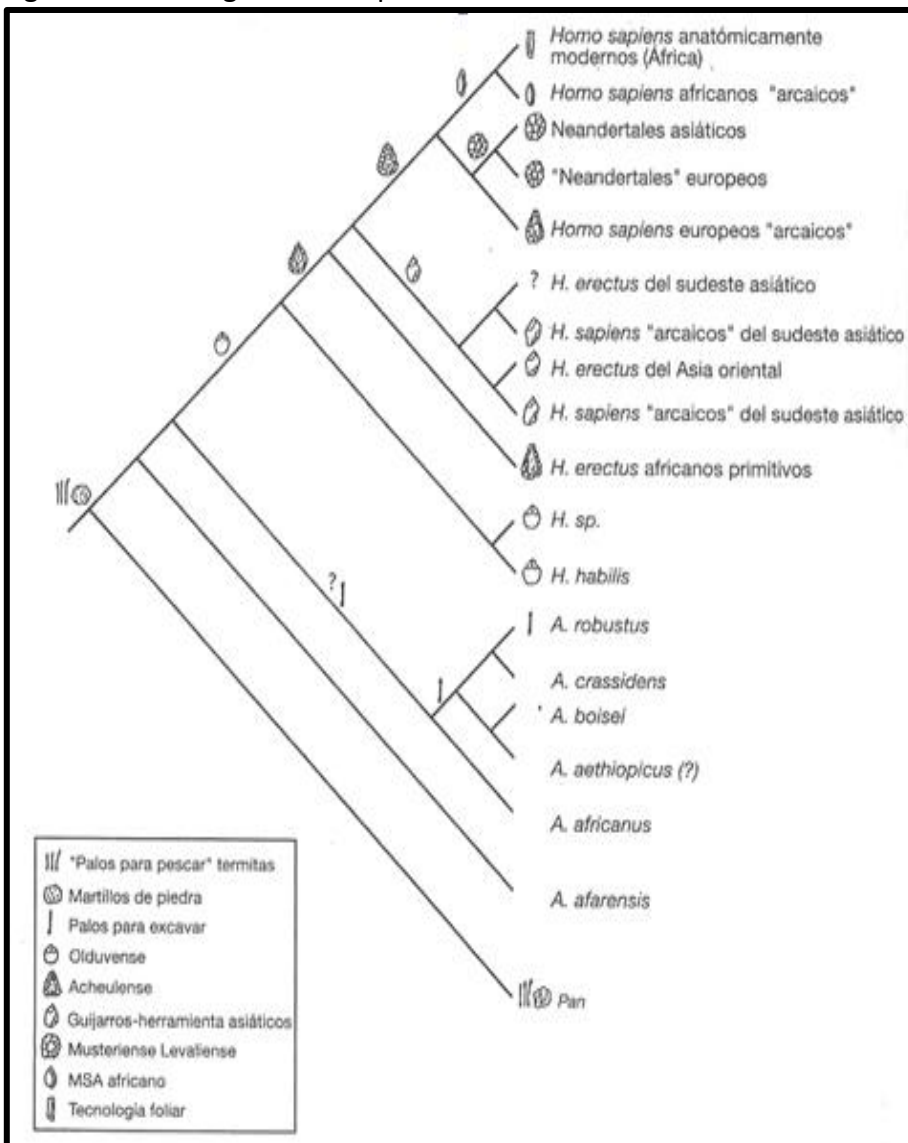
"Suponiendo que cada nuevo artefacto se basa en cierta medida en un artefacto anterior afín, debemos afrontar la cuestión del origen de la primera cosa creada. ¿Cuál fue su modelo? Aunque no había artefactos anteriores por entonces, una multitud de *naturfactos* pudieron servir de modelo para iniciar el proceso de evolución tecnológica..." (Basalla 1991:73).

El propio Basalla aporta ejemplos de tecnologías con origen orgánico, como por ejemplo la alambrada, cuyo origen es el deliberado intento de copiar una forma orgánica que funcionara eficazmente como repelente del ganado. Dada la pertinencia, se sugiere la adopción del concepto "naturfacto" como representativo del conjunto de bienes, servicios y tecnologías derivadas de las interacciones entre las tecnologías humanas y las tecnologías naturales, del proceso que denominamos "aprendizaje desde el capital

natural”, como una aproximación válida, desde el punto de vista de la disciplina económica, hacia las tres modalidades en las que (según las disciplinas señaladas antes) se produce el proceso (bioinspiración, biomimética, bioutilización).

Acerca del origen histórico de los naturfactos, es importante señalar que su éste se remonta –incluso- a la prehistoria. Tal y como lo muestra Lewin (1994) el uso de tecnologías que emplean elementos naturales adaptados para ser aprovechados en tareas específicas se remonta hasta las especies de homínidos precursores del homo sapiens sapiens, como lo muestra la figura 5 en la que se presentan algunas de las tecnologías empleadas por los homínidos prehistóricos, lo cual indica claramente que el aprovechamiento humano de las tecnologías naturales, para la producción de naturfactos, que ha permitido al ser humano obtener beneficios de los avances tecnológicos naturales, ha acompañado a los seres humanos durante todo el devenir de su desarrollo económico y tecnológico, contribuyendo a mejorar nuestro desempeño tecnológico a partir de la adopción de técnicas existentes en la naturaleza. Las aproximaciones al proceso de aprendizaje desde el capital natural tanto desde el punto de vista de la economía, como de las demás disciplinas señaladas en este texto, muestran que existe una conexión verificable entre los productos generados en la naturaleza y los artefactos o productos fabricados por los seres humanos. Esencialmente, la tecnología humana ha tomado prestadas ideas técnicas y herramientas directamente de la naturaleza; y una manera apropiada de entenderlo podría ser la de asumir que el capital natural posee la capacidad de producir bienes, servicios y tecnologías que son transformadas mediante las formas de capital producidas por los humanos (capital físico, capital humano, etc.)

Figura 5. Tecnologías usadas por los homínidos



Fuente: Lewin (1994)

En cuanto a la definición de la noción de "tecnologías naturales" o "artefactos naturales", es pertinente la referencia al artefacto como unidad de análisis tecnológico básica, el cual es definido por Basalla de la siguiente manera:

"En cada momento, la tecnología está íntimamente ligada a lo físico y lo material; los artefactos son tanto el medio como el fin de la tecnología. El objeto físico tridimensional es tanto una expresión de la tecnología como una pintura o una escultura expresión de las artes visuales. El artefacto es un producto del intelecto y la imaginación humana y, como con cualquier obra de arte, nunca puede sustituirse plenamente por una descripción verbal." (Basalla 1991: 51).

Puesto que el artefacto, se define a partir de tres propiedades (en primer lugar, es un objeto físico; en segundo lugar, es producido por los humanos, y en tercer lugar, se produce empleando recursos como el intelecto y la imaginación, además de los materiales necesarios), podríamos definir a las tecnologías naturales, por analogía, como el conjunto de elementos provenientes de los ecosistemas naturales, que son producidos por “agentes naturales”, empleando recursos propios de éstos agentes naturales, los cuáles – en principio- deben suponerse diferentes de los recursos empleados por los agentes humanos (intelecto e imaginación). Una diferencia esencial entre las tecnologías humanas y las naturales es el carácter teleológico y el comportamiento consciente de las creaciones humanas, dos características –en general- no imputables a la naturaleza.

Además de contar con una definición, es necesario abordar el problema del grado de dependencia existente entre los artefactos y los naturfactos, puesto que el reconocimiento de la existencia de los naturfactos y su importancia en el proceso de innovación no implica que la dependencia de los inventos humanos respecto de las tecnologías naturales esté fuera de discusión. En tal sentido, debe resaltarse la posición de Steven Vogel, según la cual las tecnologías naturales y las tecnologías humanas son esencialmente diferentes desde el punto de vista técnico, lo que llevaría a concluir que la producción de inventos o innovaciones en el ámbito humano no guarda una relación de dependencia frente a las tecnologías naturales. Aun reconociendo que existen ejemplos exitosos de tecnologías basadas o inspiradas en la naturaleza (en campos tales como la nanotecnología, los Análogos musculares, los materiales compuestos, materiales inteligentes, robots manipuladores, vehículos que caminan, entre otras) las posibilidades de copiar, imitar y emular a la naturaleza son limitadas (Vogel 2000: 301).

Consideraciones del análisis tecnológico para una conceptualización pertinente del concepto de “Tecnologías Naturales”

Las tecnologías natural y humana a pesar de ser diferentes en su origen, con frecuencia han encontrado soluciones análogas y han interactuado, aunque, en general, las definiciones de “invención” e “innovación” empleadas por los economistas, sesgan el pensamiento hacia la posibilidad de que las invenciones e innovaciones sean provenientes exclusivamente de los seres humanos. Así, por ejemplo Richard Nelson nos habla de la innovación como característica humana, definiéndola de la siguiente manera:

“La actividad humana dirigida a la creación de productos y procesos prácticos nuevos y mejorados” (Nelson 1959)

Es importante preguntarse si acaso no pueden provenir las invenciones (también) de procesos naturales, dada la existencia de procesos de aprendizaje no humano y la relación de permanente intercambio (coevolución) entre los ecosistemas naturales y el sistema económico (Norgaard 1984).

Es un hecho que los seres humanos se aprovechan técnicamente (y vale la pena añadir, económicamente) de los logros evolutivos realizados por otras especies. Los naturfactos, en tal sentido, son la base de muchos artefactos humanos por el hecho de que existen soluciones análogas a problemas técnicos similares, tal y como ha señalado Stephen Jay Gould:

“En los ejemplos habituales de la belleza en la naturaleza -el leopardo corriendo, la gacela huyendo, el águila remontando el vuelo, el atún nadando e incluso la serpiente reptando o la oruga geómetra desplazándose- lo que percibimos como gracia de formas representa también una excelente solución a un problema de física. Cuando queremos ilustrar el concepto de adaptación en la biología evolutiva, a menudo intentamos mostrar que los organismos “saben” física inconscientemente...Muchas cosas son imposibles para la naturaleza. Pero lo que la naturaleza puede hacer lo hace excelentemente bien. Un buen diseño se expresa a menudo por la correspondencia entre la forma de un organismo y el plano de un ingeniero” (Gould 1985:328).

Desde este punto de vista, la naturaleza es una fuente de soluciones tecnológicas eficientes (naturales) y disponibles para el uso potencial en la resolución de diseños tecnológicos humanos. En esta primera variante, puede decirse que, cuando menos, las soluciones tecnológicas naturales coinciden con las humanas.

Algunos autores han señalado que esta coincidencia, resaltando que la búsqueda de soluciones técnicas realizada por la naturaleza puede ser, con frecuencia, es un antecedente exitoso que es susceptible de ser aprehendido posteriormente por los humanos:

“En su trabajo científico y práctico ligado al proceso de creación de modernos sistemas técnicos, el hombre comprendió que muchos de los problemas que le surgen en sus actividades están ya resueltos por la naturaleza, y la mayoría de las veces, de forma más segura, más sencilla y óptima que la conseguida por él. Por lo tanto consideró conveniente y útil continuar aprendiendo de la Naturaleza. Como lo hacía el hombre cuando inventó sus primeras y rudimentarias máquinas, cuando construyó puentes colgantes y comenzó a concebir métodos para elaborar distintos productos y materiales” (Litinetski 1975:9).

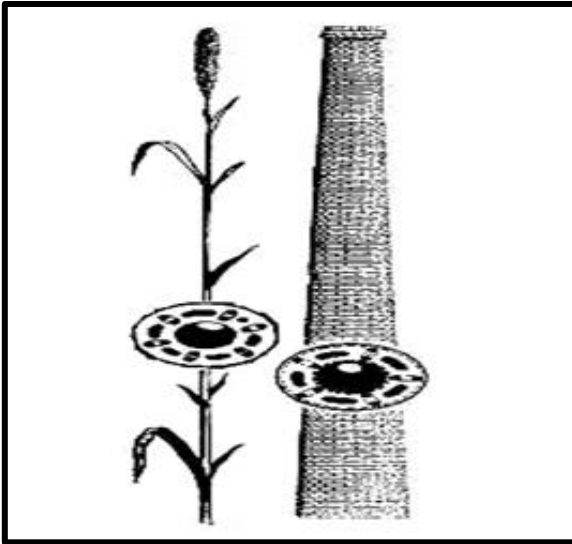
Uno de los ejemplos provistos por Litinetski puede resultar especialmente provechoso para ilustrar la hipótesis de coincidencia entre los resultados tecnológicos alcanzados – aún de manera independiente- por la naturaleza y los humanos esta ricamente representada en la descripción puntual de este ejemplo, la cual reproducimos a pesar de su extensión, dada su pertinencia:

“Una coincidencia tan singular entre las estructuras concebidas por los ingenieros (la torre Eiffel, el flatter y la chimenea fabril) puede a primera vista parecernos casual. En realidad, no existe tal casualidad. De esto podemos convencernos fácilmente si observamos con detenimiento cómo se formaron las peculiaridades estructurales, por ejemplo de la chimenea fabril y del Tricophorum. La función primordial de la chimenea, como es sabido, consiste en aprovechar el tiro necesario para la sucesión normal de los procesos de combustión y la expulsión de los gases tóxicos hacia las altas capas de la atmósfera. Esto condicionó la considerable longitud vertical de la columna de la chimenea. La altura del tallo del Tricophorum está determinada por la necesidad permanente de energía solar por parte de la planta. La chimenea y la el Tricophorum se hallan bajo la acción de los mismos factores: el viento, las tempestades, etc. La similitud de las fuerzas mecánicas exteriores que actúan sobre ambos y la necesidad de una posición vertical condicionaron la similitud de las estructuras de las mismas. Así, las soluciones dadas por el hombre y por la naturaleza resultaron idénticas” (Litinetski 1975: 18-20).

El análisis del autor contiene todos los elementos que componen una línea de pensamiento que sostiene una relación de convergencia entre las soluciones creadas por los humanos y las de la naturaleza, derivada, en este caso, de necesidades funcionales y de restricciones ambientales análogas. Las dificultades en la asimilación humana de las soluciones tecnológicas naturales serían:

- Aspectos relacionados con la comprensión teórica que la biología tiene del funcionamiento de la naturaleza
- La inexistencia de un “registro de patentes” de la Naturaleza en el que se puedan buscar soluciones aportadas por ésta
- Muchos de los creadores de tecnologías humanas han ignorado que la belleza de las estructuras naturales suele estar asociada al diseño de soluciones óptimas
- Los “secretos” de la naturaleza solo pueden ser descubiertos tras laboriosos procesos de investigación
- La complejidad intrínseca de los sistemas vivos, superior a la de los sistemas técnicos humanos.

Figura 6. Comparación estructural entre una chimenea fabril y el trichophorum



Fuente: Litinetski (1975:19)

También algunos científicos contemporáneos sostienen que la existencia de una cierta analogía entre las máquinas moleculares, estudiadas por la nanotecnología para la manipulación de la materia a escalas muy pequeñas, para la fabricación de productos (por ejemplo tejidos) de características especiales, y las máquinas diseñadas y construidas por los humanos. En la siguiente figura, se muestran algunas de las similitudes o analogías propuestas por Zhang:

Figura 7. Elementos comunes entre las máquinas moleculares y las máquinas humanas

Table 1 What do they have in common? Machines and molecular machines	
Machines	Molecular machines
Vehicles	Hemoglobin
Assembly lines	Ribosomes
Motors, generators	ATP synthases
Train tracks	Actin filament network
Train controlling center	Centrosome
Digital databases	Nucleosomes
Copy machines	Polymerases
Chain couplers	Ligases
Bulldozer, destroyer	Proteases, proteasomes
Mail-sorting machines	Protein sorting mechanisms
Electric fences	Membranes
Gates, keys, passes	Ion channels
Internet nodes	Neuron synapses

Fuente: Zhang (2003:1174).

Se supone, pues, que la observación sistemática de la naturaleza es fuente de inspiración, de información, de ilustración sobre procesos de diversa utilidad (mecánicos, biológicos, químicos, físicos, etc.). La historia de la tecnología abunda en ejemplos de inventores que afirman haberse inspirado en la observación de la naturaleza, y en parte, puede decirse que la existencia de un gran esfuerzo científico que busca escrutar los “secretos” de la naturaleza, es un indicador de que existen oportunidades de obtener conocimientos existentes en la Naturaleza.

Esta “conjetura convergente” postula, finalmente, que el diseño o idea original tienen un origen natural y después es posible la generación de aplicaciones útiles para la resolución de problemas humanos, para la construcción de tecnologías. Estamos, en este caso, frente a un proceso de imitación o copia a gran escala; un flujo de tecnología que en principio es uni - direccional y va desde el medio natural hacia el sistema económico. Una implicación interesante de este principio es que la existencia de éste flujo es un argumento más en favor de quienes han sostenido que los modelos económicos deben describir y analizar a la economía como un sistema abierto que importa flujos de input y exporta flujos de output (muchos de ellos en forma de desechos) al medio natural, a los eco - sistemas naturales, más que cómo sistemas de ciclos cerrados, “auto - contenidos”.

Otra línea de análisis de la relación entre las tecnologías naturales y las tecnologías humanas, señala que, fundamentalmente, las tecnologías naturales y humanas obedecen a problemas y soluciones de carácter diferenciado, y permite postular que las tecnologías naturales pueden ser, además, un componente esencial de los procesos tecnológicos, que puede estar relacionado de diversas maneras con la innovación tecnológica, unas veces como proveedor de inputs y materiales, otras como fuente de inspiración y algunas veces como proveedor de modelos o esquemas que permiten a los humanos ir más allá de la copia, a desarrollar procesos de “Bio - emulación”.

En tal sentido, los naturfactos son técnicamente diferentes a los artefactos (y por tanto obedecen a las diferentes necesidades de las poblaciones humanas y naturales). Esto cuestiona aspectos básicos de la hipótesis convergente, que supone una analogía entre ellas, tal y como ha sido señalado por Steven Vogel, en su estudio comparativo de tecnologías humanas y no humanas:

“La (tecnología de la) naturaleza es esencialmente minúscula, húmeda, no metálica, sin ruedas y flexible. La tecnología humana es principalmente todo lo contrario: grande, seca, metálica, con ruedas y rígida. Allí donde una tecnología opera en lo que normalmente es el dominio de la otra, la emulación es prometedora” (Vogel 2000:301).

La no existencia de características esenciales análogas entre las tecnologías natural y humana, la bio - emulación (emulación de lo vivo) y no la copia, sería la característica principal del flujo de tecnologías desde los ecosistemas hacia la economía.

La siguiente ilustración muestra un juguete mesoamericano que emplea una de las tecnologías que según la “conjetura divergente” es exclusivamente humana: la rueda. Curiosamente, el juguete demuestra la universalidad de ésta tecnología, presente en diversas culturas humanas aunque –como es el caso de los Aztecas- no se hayan desarrollado aplicaciones tales como el transporte rodado.

Figura 8. Tecnología Humana - Juguete Azteca Con Ruedas Y Ejes



Fuente: Basalla (1988:29)

En cuanto al núcleo del argumento de Vogel, cabe destacar que la comparación entre tecnologías humanas y no humanas es posible, en primer lugar, porque efectivamente las segundas existen; y este es un hecho que como hemos visto es aceptado entre científicos de disciplinas diferentes de la nuestra. Además, la aplicación de conceptos económicos debe permitirnos pasar del análisis estrictamente físico o biomecánico, hacia el descubrimiento de las implicaciones económicas propiamente dichas. Es por esto que vale la pena anotar un par de matices que pueden considerarse como relevantes:

En primer lugar, La existencia de los naturfactos provenientes de la parte no viva del capital natural (por ejemplo, las primeras hachas e instrumentos de corte) nos recuerda que la bio - emulación no es el único tipo de relación en la cual los humanos sacan provecho del capital natural, que está compuesto de elementos vivos (especies animales y vegetales) y no vivos (combustibles fósiles, piedras, minerales).

En segundo lugar, su argumentación se refiere, principalmente de los aspectos mecánicos de las tecnologías analizadas. Es necesaria la aplicación de conceptos económicos que nos permitan reconocer características económicas de los naturfactos; por ejemplo, el hecho de que éstos pueden ser aprovechados como ideas o diseños (por lo tanto no debemos limitarnos a los aspectos materiales, físicos o mecánicos).

El enfoque de Vogel parece implicar que, tanto los problemas técnicos enfrentados por los humanos y la naturaleza, como las soluciones, son esencialmente diferentes. Su aporte es la diferenciación de las características de los productos dado su origen (problemas y soluciones diferentes), pero es necesario considerar que, desde el punto de vista del análisis económico debemos distinguir entre el concepto de “técnica” y el de “producto tecnológico”; Vogel nos habla, en este sentido, de productos más que de técnicas.

Adicionalmente, la relación entre las técnicas (instrucciones naturales e instrucciones humanas) es de copia, adaptación o emulación, en el sentido en que la capacidad de aprendizaje humana hace posible descifrar y adaptar las técnicas naturales. Finalmente, existen áreas de convergencia, dado el papel importante desempeñado por los bio - productos en los procesos de innovación (como veremos), dadas por la integración de productos naturales con humanos (por ejemplo las nano tecnologías, los productos marinos y los fármacos, entre otros).

El punto de vista aquí expuesto sugiere que, a pesar de que las tecnologías naturales y humanas son diferentes si se consideran sólo como objetos materiales, pueden integrarse si ampliamos nuestra visión para incluir sus características intangibles como información, instrucciones o conocimientos.

El caso de materiales extraídos de organismos marinos puede ser útil para ilustrar esta situación. En la fabricación de polímeros, la empresa Byopolimers, Inc desarrolló y comercializó dos patentes a partir de la proteína adhesiva del “mejillón adhesivo” (el polifenol), descubierto por el biólogo marino Herbert Waite y patentado por Benedict, y Chaturvedi (1990) en la patente No. 4908404, para un aminoácido sintético y/o péptidos

que contienen copolímeros injertados; y la patente No 5015677 de Benedict y Picciano (1991) para un adhesivo derivado de las proteínas polifenólicas:

“Esta molécula forma enlaces fuertes y flexibles en prácticamente cualquier superficie, natural o manufacturada, húmeda o seca. El secreto de su versatilidad es la inusual composición química de la proteína. No sólo interactúa fácilmente con materiales fabricados, metales y plásticos, sino también con el tejido vivo de huesos, huesos y la piel” (Benedict 2002:69)

Puede constatarse, pues, el empleo de propiedades o características propias de los productos naturales que les permiten integrarse con los productos humanos, es decir, se trata de naturfactos integrados con artefactos que son llevados al mercado:

“La tendencia habitual en los campos de la ciencia y la ingeniería es reemplazar los productos naturales con productos fabricados con sustancias sintéticas. En al menos un caso, sin embargo, un producto natural marino no tenía sustituto: algunos aceites de pescado fueron tan eficaces como lubricantes en joyas, relojes y giroscopios altamente sensibles, que ningún producto sintético pudo reemplazarlos. En cambio, los relojes digitales reemplazan los instrumentos mecánicos y los fluoropolímeros sintéticos fueron desarrollados para ser incorporados (pero aún sin sustituir) los lubricantes naturales del mar” (Meyer 2002:75).

Así que existe un proceso de “intercambio” de tecnología entre los ecosistemas y el sub - sistema económico.

Las relaciones de Inspiración, copia de diseño, uso directo del naturfacto para tareas humanas, Bio - emulación y Bio - resistencia son muestras empíricas de la existencia de flujos de conocimientos que son permanentemente intercambiados por el ecosistema global y el sub - sistema económico, y que son aprovechados en el sistema de innovación a partir de procesos de aprendizaje.

Consideraciones del análisis económico para la conceptualización de las “Tecnologías Naturales” y del “Aprendizaje del Capital Natural.

Una correcta comprensión del proceso innovador es -desde el punto de vista del economista- una condición necesaria para el análisis de las posibilidades teóricas (y reales) que una economía tiene de alcanzar la Sostenibilidad. En consecuencia, la consideración explícita del impacto que el cambio tecnológico tiene sobre dicho proceso (y por lo tanto de las políticas económicas pertinentes) es una variable insustituible en el análisis del

Desarrollo Sostenible (esto puede ser constatado tras una revisión de los diversos modelos de Desarrollo Sostenible, como la realizada en los capítulos anteriores).

Un buen punto de partida es el reconocimiento del hecho de que, a pesar de los grandes avances experimentados por las diversas teorías de la Innovación tecnológica, aún persisten algunos problemas interesantes que han sido soslayados. El profesor Nathan Rosenberg ha ilustrado esta situación claramente en un ensayo titulado “Problemas del economista en la conceptualización de la innovación tecnológica”:

“Se ha conseguido cierto significativo progreso. Sin embargo, argumentaré que nuestro esquema cognoscitivo nos hace interpretar de forma errónea el proceso y, como resultado, ignorar o subestimar la importancia de muchas formas de cambio tecnológico. Argumentaré, en particular, que nuestro razonamiento sobre estas materias ha sido gravemente agrietado por un fuerte prejuicio contra el reconocimiento de la total importancia económica de muchas formas de conocimiento valioso, intrínsecas a actividades de naturaleza tecnológica” (Rosenberg 1979:73).

Siguiendo la línea de razonamiento planteada por el lúcido diagnóstico del profesor Rosenberg, intentaremos mostrar la importancia que tienen diversas formas de conocimiento tecnológico propias de un proceso específico de cambio tecnológico derivado de la interacción entre los sistemas natural y económico: El Aprendizaje del Capital Natural.

Argumentaremos que una correcta definición de éste y algunos otros conceptos relacionados (Tecnologías Naturales y Naturfactos, por ejemplo) ofrece oportunidades para mejorar nuestra comprensión de los procesos de innovación y sostenibilidad y, con ello, la posibilidad de formular políticas económicas pertinentes para su protección.

6.4. Artefactos Biológicos, Conocimiento y Aprendizaje en los Procesos de Co - Evolución en la Perspectiva de la Economía Ecológica

El profesor Richard Norgaard ha sido uno de los economistas que ha hecho el intento analítico de reconocer la existencia de procesos de aprendizaje no exclusivamente humanos, relacionados con procesos de desempeño evolutivo nos ofrece una primera idea importante acerca de la relación entre el conocimiento contenido en los sistemas naturales y el sistema económico. Como puede verificarse en este par de párrafos:

“Animales, incluso amebas, aprenden. Los sistemas sensoriales, incluso de los animales más simples permiten reconocer los diferentes estímulos. De manera parecida, el cerebro incluso de las especies menos desarrolladas deduce causa y efecto y extrapolar la experiencia a nuevas situaciones. El pensamiento occidental ha hecho hincapié en el aprendizaje formal y descuidado el innato... Los animales no sólo aprenden, sino que aprenden juntos. Las hormigas, los lobos y los humanos han aprendido -en muy diferentes formas- a vivir en grupos sociales” (Norgaard 1984:165).

Para Norgaard tanto nuestra supervivencia, como la posibilidad de que alcancemos situaciones de sostenibilidad, dependen de una comprensión adecuada de nuestras relaciones con la naturaleza, así como del funcionamiento mismo del medio ambiente, sus componentes individuales y las interacciones que los caracterizan:

“Las nuevas Tecnologías, por ejemplo, ejercen nuevas presiones selectivas sobre las especies, mientras que las características recientemente evolucionadas de las especies, a su vez, seleccionan diferentes tecnologías. De manera similar, las transformaciones en la biosfera seleccionan nuevas formas de entender la biosfera. Por ejemplo, el uso de pesticidas induce a la resistencia y resurgimiento secundario de plagas, seleccionando tanto nuevos plaguicidas como formas más sistemáticas de pensar acerca del control de plagas” (Norgaard 1994:217).

En este capítulo trataremos de desarrollar una segunda acepción del término “Aprendizaje Del Capital Natural” según la cual, puede decirse que existe una cierta relación dinámica en la que el sistema económico deriva conocimientos de su relación con el medio ambiente, y a su vez, algunos agentes naturales acumulan conocimientos, que tiene lugar gracias a la existencia de procesos de aprendizaje.

Uno de los teóricos que ha explorado de manera profunda y sistemática el papel desempeñado por el conocimiento y el proceso de aprendizaje es Kenneth Boulding. En especial, es importante resaltar que, de hecho, algunas de sus ideas ofrecen un punto de partida adecuado para el estudio del papel desempeñado por las tecnologías y productos naturales en el proceso económico. Empezaremos, pues, exponiendo algunos rasgos de su estudio del proceso económico evolutivo, para llegar a definir específicamente algunas de sus aportaciones referentes a la naturaleza de los procesos de aprendizaje y conocimiento. En los escritos de Boulding podemos encontrar una reflexión sistemática sobre conceptos de nuestro interés:

- Las Características básicas de la interconexión entre sistemas natural y económico

- La Existencia de procesos de intercambio entre los sistemas naturales y humanos,
- La identificación de Tecnologías y Agentes –productores- Naturales
- El énfasis en la importancia de los procesos de acumulación de conocimientos y de aprendizaje, como característica fundamental del desarrollo económico
- Una diferenciación entre conocimientos (diferenciados por tipos) y una exploración de su relación con los procesos de aprendizaje.

Desde el punto de vista de Boulding, existe un proceso general de evolución del que hacen parte los ecosistemas, que evolucionan en estrecha relación con la “Econosfera” – esfera de actividades económicas-, y la “Sociosfera” o esfera de todas las actividades, relaciones e instituciones humanas. Dicho proceso evolutivo general se produce con la participación de poblaciones de diferentes tipos de especies naturales y humanas (especies químicas, especies biológicas, especies sociales) que provienen de procesos de producción que crean, a su vez, “artefactos naturales” y “artefactos humanos”. En este sentido, existen dos tipos de artefactos que provienen de dos clases distintas de especies. En su análisis es claro que en primer lugar, existen procesos biológicos de producción (naturales) que producen artefactos biológicos, y después aparecen los humanos.

Empleando un sugerente ejemplo, Boulding señala la existencia de una estrecha relación entre los artefactos humanos y los naturales:

“Los artefactos humanos son especies precisamente como muchos artefactos biológicos. El automóvil es tanto una especie como el caballo. Los artefactos humanos entran en relaciones ecológicas entre sí y con artefactos biológicos. El automóvil es competitivo con el caballo y ha reducido sus números; es cooperativo con las estaciones de servicio y ha aumentado su número; es cooperativo con las especies de "seres humanos capaces de conducir un automóvil" y ha aumentado el número de conductores. Es un depredador con el abastecimiento de petróleo, ya que está disminuyendo su cantidad hasta el punto que en algunas décadas ambas especies estarán en peligro de extinción” (Boulding 1978:122).

Además de exponer la existencia de los “artefactos biológicos” (que pueden ser las especies en sí mismas), Boulding atribuye a éstos la capacidad de adquirir nuevos conocimientos a través de procesos de aprendizaje, especialmente en los grandes mamíferos y pájaros. Su argumentación contiene pues, claramente una comprensión de la existencia de agentes económicos naturales, aunque, dada la evidencia presentada en el capítulo anterior (en el que las bacterias podían ser una fuente eficaz de conocimientos útiles para los humanos, por ejemplo), podríamos agregar que en la conceptualización de Boulding es identificable un sesgo en favor de aquellas formas de vida que se asemejan

más a los seres humanos, caracterizadas por el hecho de que poseen una capacidad superior de aprendizaje (Boulding 1978:133).

De otra parte, el proceso de comunicación entre la econosfera y los ecosistemas implica, además del intercambio de energía y materiales, un intercambio de conocimientos, posibilitado por procesos de aprendizaje:

“Los procesos Creodicos son tan importantes en la producción de artefactos humanos como lo son en la producción de artefactos biológicos, para la producción humana también consiste en cómo llegamos del genotipo al fenotipo” (Boulding 1976:297)

De esta manera, se establecen las diferentes características del tipo de conocimiento que corresponde a cada tipo de agente económico (natural, humano): en tanto que los artefactos biológicos son producidos por el conocimiento genético biológico, los artefactos humanos son el resultado de procesos del tipo “know-how” (saber cómo).

El conocimiento está implicado en la totalidad del proceso evolutivo (natural, social, económico). Para Boulding, la característica principal del desarrollo económico es que – en esencia- consiste en un proceso de conocimiento y aprendizaje. En su “Richard T. Ely Lecture” del año 1965 resaltaba este hecho:

“El reconocimiento de que el desarrollo, incluso el desarrollo económico, es esencialmente un proceso de conocimiento se ha penetrado poco a poco en la mente de los economistas, pero estamos todavía demasiado obsesionados por modelos mecánicos, ratios de capital de renta, e incluso tablas de insumo-producto, en detrimento del estudio del proceso de aprendizaje que es la verdadera clave para el desarrollo” (Boulding 1966:372).

En cuanto a la diferenciación hecha entre los conceptos de “conocimiento” y “aprendizaje”, los identificó como stock y flujo, respectivamente, dado que el conocimiento es esencialmente un stock, en tanto que el aprendizaje (como información) es un flujo que puede sumar o restarse al stock¹².

Además, de una forma parecida a la que han adoptado algunos teóricos de la llamada “Nueva Teoría del Crecimiento Económico”, Boulding anotó que el conocimiento como tal posee las características de apropiación incompleta.

¹² Esta distinción es hecha, igualmente, por Kenneth Arrow en su formulación del “Learning by Doing”.

El conocimiento es la única cosa que puede crecer o evolucionar, en tanto que la materia y la energía están sujetas a las leyes de la conservación: lo que un sistema recibe, otro debe proporcionarlo. En el caso de la energía, la segunda ley de la termodinámica la somete a degradación. Así que, desde el punto de vista de la energía, todos los procesos en el tiempo son simplemente el agotamiento de un potencial pre – existente; siendo la excepción el conocimiento, que no es agotable –necesariamente–:

“sólo la información y los procesos de conocimiento en algún sentido van más allá de las férreas leyes de la conservación y la decadencia, a pesar de que sólo lo hacen, por así decirlo, al operar a otro nivel” (Boulding 1966:371).

Podría decirse que existe un stock total de conocimientos, compuesto por una parte de origen natural y otra de origen humano, el papel desempeñado por los procesos de aprendizaje, es el de adicionar elementos al stock existente.

En un artículo: La poca importancia de la energía “The unimportance of energy” en el año 1982, dedicado al análisis de los factores de producción, el autor describe un proceso evolutivo compuesto por factores limitantes y factores “potenciales” (Espacio, Tiempo, Materia, Energía, Información, Know-How, Know What). Los factores energía, materiales, espacio y tiempo son factores limitantes sin los cuales el potencial que está presente en el factor “genético” no puede realizarse; la producción tiene lugar cuando alguna clase de know-how o plan es capaz de capturar energía para transportar y transformar materiales

El know-how contiene el potencial para hacer un producto, y sus incrementos permiten economizar el uso de los factores limitantes: Boulding representa este proceso mediante una función en la que existe un límite inferior común a los factores limitantes, que es expandido por los incrementos en el know-how.

Para Boulding el conocimiento no es –estrictamente hablando– una mercancía privada, dada su heterogeneidad intrínseca, y señala que, aunque el conocimiento tiene muchos aspectos de propiedad, su capacidad de reproducción en muchas mentes y su accesibilidad en forma de palabras publicadas, la hacen una forma peculiar de propiedad, de tal manera que una parte del conocimiento es exclusivo (por ejemplo las patentes y los secretos comerciales), pero -lo que es quizá más importante- posee la propiedad de generar conocimiento nuevo que se adiciona la stock ya existente.

Como vemos, el conocimiento no es uniforme, y debe ser diferenciado. La producción de nuevos conocimientos es posible gracias a dos procesos; en primer lugar, ocurre el

llamado “Printing”, o proceso mediante el cual una estructura es capaz de reproducirse, por ejemplo haciendo una copia de sí misma. Desde este punto de vista, la producción de mercancías en masa es un proceso de “printing” generalizado, en el que ocurre la transmisión de conocimientos a través del aprendizaje. En segundo lugar, tenemos un segundo proceso denominado “organizing”, dado que el “printing” por sí solo no es capaz de organizar un proceso de desarrollo evolutivo. Boulding ofrece diversos ejemplos de “organizing”: una idea que lleva a la creación de una organización; un plano que permite la creación de un edificio; un conjunto de genes es capaz de organizar un fenotipo. Un par de funciones complementan su descripción del proceso de producción de nuevos conocimientos (la función de reemplazo, la cual es necesaria para restaurar el conocimiento existente y la estructura del capital; y la función de desarrollo, la cual mejora, expande y re - organiza la estructura del conocimiento en nuevas formas).

Puede verificarse, entonces, que en la obra de Boulding, de hecho tenemos una conceptualización coherente que apunta hacia una teorización del funcionamiento del proceso de evolución y del proceso de desarrollo económico, en la que simultáneamente operan las restricciones físicas (leyes de conservación y leyes termodinámicas) y la creación de conocimiento nuevo, en la que se considera el fenómeno de aprendizaje desde los ecosistemas, es decir, desde el capital natural.

Con los aportes pioneros realizados por Boulding, tenemos claros antecedentes para plantear que existe un stock de conocimiento que se divide, según su origen en natural y hecho por el hombre; que posee ciertas propiedades (es reproducible, no es completamente apropiable), además de ser el factor decisivo para contrarrestar los efectos de los factores limitantes del desarrollo económico en el largo plazo.

Tenemos, igualmente, además del reconocimiento de la existencia de los Naturfactos, una diferenciación clara entre ellos de manera que éstos pueden ser dos cosas diferentes: “artefactos naturales”, es decir, bienes y, además, “know-how natural”, es decir, una forma de conocimiento natural. Boulding ha aportado una definición de conocimiento y aprendizaje como stock y flujo, además de establecer propiedades importantes de los mismos; la teoría de los sistemas nacionales de innovación puede contribuir a complementar y profundizar esos conceptos desde el punto de vista de la economía evolutiva.

6.4.1. Las Diferencias Entre Técnica Y Tecnología: El Análisis De Joel Mokyr

El concepto de tecnología, en su acepción más genérica- se refiere ante todo a cierta clase de conocimiento económicamente aprovechable que es creado, en principio, sin que – necesariamente- la motivación del agente creador sea puramente económica. Este hecho ha llevado al historiador de la tecnología Joel Mokyr a dar énfasis prioritario al análisis del crecimiento del acervo de conocimientos, respecto del análisis de las motivaciones individuales:

“La tecnología es el conocimiento. El conocimiento, como es bien sabido, siempre ha sido un concepto difícil de manejar para la economía estándar.... Se produce en el sistema, pero la motivación de sus productores rara vez son puramente económico.... Un enfoque más fructífero, iniciada por Olsson (2000, 2003) es modelar el conocimiento como un conjunto, y analizar su crecimiento en términos de las propiedades de los conocimientos existentes en vez de buscar las motivaciones de los agentes individuales” (Mokyr, 2003:5).

La tecnología debe entenderse -en esencia- como conocimiento económicamente aprovechable, que tiene ciertas propiedades específicas (por ejemplo, puede ser acumulado). La utilización de conceptos tales como tecnología y técnica, sobre todo cuando se trata de la construcción de modelos de crecimiento económico, es ambigua. Por ello, es necesario contar con alguna definición explícita, clara y relevante que nos permita una descripción adecuada de las propiedades de la tecnología natural. En principio, un análisis esclarecedor de las propiedades de la tecnología puede encontrarse en el marco de la llamada "Nueva teoría del crecimiento económico" o "Teoría endógena del crecimiento económico"; en especial en el trabajo de Paul Romer.

El acervo total de conocimientos se compone, en principio, de dos grandes clases: En primer lugar está el conocimiento tácito (o proposicional, en la terminología de Mokyr) este tipo de conocimiento tecnológico se caracteriza porque:

- Es creado mediante procesos de aprendizaje por experiencia, por procesos de ensayo y error.
- No es, en principio, sujeto de intercambio en el mercado.
- Es, en consecuencia, difícil de transmitir
- Puede ser "descubierto", más que "inventado"

El Conocimiento acumulado por los agentes naturales es, esencialmente, producto de procesos evolutivos de ensayo y error; es por ello que el "aprendizaje del capital natural"

es, en buena medida la conversión de conocimiento tácito en codificable, y se integra en el proceso productivo sin que el mercado le asigne un precio.

En segundo lugar, tenemos el conocimiento codificado (prescriptivo, según la terminología de Mokyr), el cual se acumula de manera incremental y se caracteriza por tener su origen en procesos sistemáticos de búsqueda y está codificado –por ejemplo con símbolos matemáticos, con lenguaje de tipo científico. Es sujeto de intercambio en mercado, es, por tanto, fácilmente comunicable y puede ser "inventado", es patentable.

Siguiendo a Mokyr, una técnica puede definirse como un conjunto de instrucciones de cómo producir bienes y servicios. Cada bien o servicio disponible en el circuito económico, supone la existencia de una técnica, por lo que estamos hablando de una asociación necesaria entre cada artefacto y las instrucciones que permiten su producción. No obstante, es necesario aclarar que cada técnica debe ser descifrada, leída o interpretada, por lo que se requiere cierta *competencia* (un concepto análogo al de "rutinas" en Nelson y Winter) o capacidad para comprender y ejecutar el conocimiento ya sea éste tácito o explícito:

“La competencia consiste en el conocimiento de cómo leer y ejecutar las instrucciones de la técnica y el conocimiento tácito suplementario que no pueden ser completamente escrito en instrucciones codificadas de la técnica” (Mokyr 2003:8).

Entonces, la *producción humana* es el acto mediante el cual el productor (agente económico humano) ejecuta una técnica, siguiendo las instrucciones necesarias; sacando provecho del acervo de conocimientos disponible (es decir, de la tecnología), mediante el empleo de su competencia para hacerlo.

Una *Técnica natural*, puede ser definida, entonces como un conjunto de instrucciones propias del agente natural, en tanto que el *proceso de producción natural* puede asumirse como el acto mediante el cual el agente económico natural ejecuta una técnica.

Una diferencia de importancia entre el proceso de producción humano y el proceso de producción natural, consiste en el hecho de que la propiedad de competencia es asimétrica: en agentes naturales no se produce mediante procesos de comprensión, sino de procesos evolutivos, como la selección natural.

6.4.2. Conocimientos, Aprendizaje e Innovación en La Teoría De Los Sistemas Nacionales De Innovación

El profesor Bengt Ake Lundvall, en el contexto de la teoría de los sistemas nacionales de innovación, ha propuesto el concepto de “Learning Economy”, el cual tiene dos acepciones:

- Una perspectiva teórica que hace énfasis en la explicación de cambio tecnológico, preferencias, instituciones y habilidades.
- Puede referirse a tendencias históricas que hacen del conocimiento y el aprendizaje factores de creciente importancia en la economía.

Y puede decirse que ambas pueden entenderse como el resultado de procesos recíprocos de aprendizaje:

“Sin embargo, uno debería notar que la diferencia entre el aprendizaje por la práctica y el aprendizaje por el uso principalmente es de perspectiva. Lo que es el aprendizaje por la práctica para una compañía es aprendizaje por el uso cuando es visto desde las compañías que le ofrecen suministros, por ejemplo, la maquinaria. El tema principal es la importancia de los vínculos entre usuarios y productores, y estos pueden ser tanto hacia delante como hacia atrás. Para innovar exitosamente, los productores pueden depender críticamente de la información proveniente de los usuarios, y viceversa. Esta es la base de la idea del aprendizaje interactivo” (Lundvall 1988).

Lundvall ha realizado un revelador análisis de las formas de conocimiento y aprendizaje que puede permitirnos una profundización respecto de la propuesta de Boulding. Algunas de las características del conocimiento que destaca son; que el conocimiento es un activo colectivo compartido en redes y organizaciones y que, el aprendizaje es un proceso esencialmente interactivo.

Para nosotros es de importancia descubrir qué parte de ese activo colectivo proviene de sistemas de innovación natural. Un primer paso puede ser la identificación de las formas concretas que puede adoptar, en su clasificación por tipos de conocimiento:

- Know-what: Conocimiento acerca de hechos, es la forma de conocimiento más parecida a la información
- Know-why: conocimiento acerca de principios y leyes de movimiento de la naturaleza. Ha sido muy importante para el desarrollo tecnológico en áreas tales como las industrias química, eléctrica y electrónica.

- Know-how: Habilidades o capacidades para hacer algo, para ejecutar tareas específicas.
- Know-who: Información acerca de Know what y además sobre los agentes que saben hacer determinadas tareas específicas. Involucra la capacidad social para establecer relaciones entre grupos de expertos.

El aprendizaje consiste, en consecuencia, en el dominio y absorción de estos diferentes tipos de conocimiento a través de diferentes canales; tanto el Know-what, como el Know – why pueden obtenerse a través de libros, cursos, bases de datos, es fácilmente codificado y transferido como información, y por lo tanto puede transarse en un mercado con facilidad. Para Lundvall, una de las razones por las cuales la teoría económica estándar se dedica al estudio –generalmente- de estas dos formas de conocimiento es su capacidad para convertirse en elementos reconocibles en el mercado.

Las relaciones específicas entre los diferentes tipos de aprendizaje y de conocimiento pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Learning By Doing (Arrow): Aprendizaje a través de la práctica y la acumulación de experiencia, que conllevan mejoras en la eficiencia.
- Learning By Using (Rosenberg): El usuario de un producto o una tecnología, desarrolla habilidades, en un proceso de mejora a partir del contacto con la tecnología.
- Learning By Interacting (Lundvall): Tanto el oferente como el demandante interactúan y se produce una mejora recíproca.

Y algunas de las formas de conocimiento asociadas:

- Know - how: Está presente en procesos de experiencia práctica e interacción social. Puede ser aprendido en relaciones del tipo aprendiz-maestro, y es conocimiento que no puede ser transmitido con facilidad, se adquiere solo con años de experiencia a través de la práctica y con la participación e interacción en redes de expertos.
- Know who: Está presente en procesos de experiencia práctica e interacción social; es aprendido en la práctica social y algunas veces en ambientes educativos especializados, se desarrolla en la relación con clientes y compradores. Es conocimiento socialmente incorporado que no es fácilmente transferible a través de canales formales de información. No puede venderse en el mercado sin que se produzca pérdida de sus funciones intrínsecas.

Podemos plantear una analogía con los conceptos de “naturfacto” y de “agente natural”, es decir, los componentes del capital natural relacionados con la acumulación de conocimientos, y encontramos que:

- Contribuyen a incrementar el conocimiento humano (know – what) al proveer información, que puede ser leída, interpretada y codificada por los humanos.
- Una diferencia notable entre los agentes naturales y los agentes humanos es que los primeros no necesitan el llamado know why: son capaces de crear soluciones tecnológicas sin ser “conscientes” o saber el “porqué”; operan a través de mecanismos evolutivos de ensayo y error.
- El know how seguramente es una de las formas de conocimiento más importantes para los agentes naturales; la resolución de un determinado problema tecnológico es evidencia de que los agentes naturales conocen o descubren la manera de hacerlo (puede pensarse por ejemplo en la biorecuperación)
- Otra forma de conocimiento de gran importancia es el know who, estimulado mediante el uso de un organismo o un compuesto para solucionar un problema o para crear un producto, que puede ser, por ejemplo, una sustancia química
- Una variante del “Learning by interacting” opera cuando se produce la interacción tecnológica entre agentes humanos y naturales. Tanto la innovación natural como la humana son resultado de procesos acumulativos de aprendizaje que en muchas ocasiones es recíproco (por ejemplo en el caso de la resistencia antibiótica).

El intento de entender las características del conocimiento proveniente del capital natural consiste en la comprensión de los mecanismos a través de los cuales los humanos aprovechamos el conocimiento contenido en los ecosistemas a través de procesos de interacción, de aprendizaje

Debe existir, necesariamente una correspondencia entre los procesos de aprendizaje humano y el conocimiento existente en la naturaleza de tal manera que; para que se produzca un proceso de aprendizaje en relación con el capital natural, debe existir antes un stock de conocimiento natural, a partir del uso de conocimiento tecnológico que está incorporado en el capital natural.

6.4.3. El Concepto De Aprendizaje Del Capital Natural: La Propuesta De Olman Segura

La existencia de los naturfactos en sus diversas formas (como técnicas, como bienes) y su aprovechamiento en manos de los agentes humanos, genera beneficios económicos que no son totalmente apropiables por el agente productor aunque son susceptibles de serlo

parcialmente por científicos, ingenieros e innovadores en general (ya sean estos individuos o empresas). Como puede observarse, una de las debilidades básicas de los conceptos de capital natural revisados en capítulos anteriores, es que ignoran la capacidad que el capital natural posee como generador de aportes tecnológicos al sistema de innovación (además de proveer materiales e información). Para remediar este problema, puede resultar importante el concepto de “Learning From Natural Capital”, propuesto por el profesor Olman Segura.

Esta variante del concepto de “Aprendizaje del Capital Natural” ha sido desarrollada como una integración conceptual entre categorías analíticas provenientes de la Teoría de los sistemas nacionales de innovación y la Economía Ecológica.

Los antecedentes, desde el punto de vista de la primera, se remontan a la noción de “Paradigma Tecno económico Verde”, propuesto por Freeman (1992), el cual sería un paradigma emergente, que podría sustituir al dominante. Este debe basarse en las “Eco - innovaciones” (que pueden ser ideas, comportamientos, productos o procesos) orientadas hacia la reducción del daño ambiental o la carga soportada por los eco - sistemas. La existencia de eco – innovaciones está, desde este punto de vista, relacionada con la dirección deseable para el cambio técnico

La pregunta clave formulada por Segura es; ¿Podemos los humanos aprender de nuestra relación con la naturaleza?, o bien: ¿De qué manera la economía del aprendizaje puede aprender de la relación entre la economía y el medio ambiente?

Esta pregunta tiene sentido en el contexto particular: La teoría de Sistemas Nacionales De Innovación, que habla de una “Learning Economy”, según la cual el sistema económico es propenso al cambio continuo, y hace énfasis en el hecho de que una característica predominante del sistema económico es la generación de procesos de aprendizaje (uso del conocimiento).

Segura habla, entonces, de tres clases de conocimiento; el conocimiento directo (Organizaciones formales), el conocimiento indirecto (interacciones usuario – productor) y el conocimiento del capital natural, definido como:

“el proceso de transformación en el nivel primario, o a partir de la interacción entre los sistemas de producción y las actividades de limpieza, la renovación del medio ambiente, el paisaje natural o servicios de recursos naturales usados en el

proceso; o en otras palabras, cuando las actividades económicas están en contacto con la naturaleza (el conocimiento del capital natural)” (Segura 1999:162).

El cual no habría sido considerado –en términos generales- en el análisis económico, los procesos de planeación económica o la propia teoría de Los Sistemas Nacionales de Innovación.

Esta variante del concepto, retoma el concepto de eco-innovación de Rennings:

“En resumen, considerando el conocimiento imperfecto, la inflexibilidad, los aspectos institucionales y los costos de transacción, parece mucho más eficiente crear políticas de apoyo a las innovaciones que reducen las externalidades globales (Rennings 1998); o en mis palabras políticas para aprender de la naturaleza” (Segura 1999:167).

Este concepto de Aprendizaje del Capital Natural tiene un sentido orientado hacia la adopción de políticas económicas; es decir, se refiere a las acciones que podrían estimular la generación de innovaciones que reduzcan las externalidades ambientales negativas.

La importancia de señalar esta conexión con la definición del término Eco-innovación hecha por Rennings, consiste en que nos permite mostrar la necesidad de complementarla, de tal manera que permita la inclusión de innovaciones provenientes de los agentes naturales (Naturfactos), puesto que las fuentes de cambio técnico tenidas en consideración -inicialmente- son el “empuje” tecnológico, el “empuje” institucional, y las demandas del mercado. Segura se fija, correctamente en el hecho de que además de la disponibilidad de conocimiento tecnológico, es de vital importancia su posesión y uso:

“Una característica importante de un buen funcionamiento de los sistemas de innovación no sólo es producir conocimiento, o tenerlo (tácito o codificado), sino también "usarlo". En este sentido, hay impactos positivos y negativos muy bien conocidos, y hay una gran cantidad de conocimiento acerca de los beneficios de los servicios naturales y ambientales; Sin embargo, tendemos a no usar este conocimiento, o no considerar los efectos negativos producidos por nosotros en el sistema” (Segura 1999:170).

La evidencia presentada en este trabajo, nos permite afirmar que los humanos hemos estado usando el conocimiento del capital natural, y que este uso –además de una posibilidad futura- ha sido una realidad en el pasado y se está incrementando en la actualidad.

La inclusión de servicios tecnológicos originados en agentes naturales, puede ser un buen punto de partida para complementar la definición de “Aprendizaje del Capital Natural”.

Uno de nuestros argumentos principales, es que deben tenerse en cuenta además de las “eco – innovaciones” hechas por los humanos, las innovaciones tecnológicas aportadas por los agentes económicos naturales. Creemos que, de este modo observaremos que, la pregunta representativa -¿Es posible aprender de las relaciones con la naturaleza?- debe complementarse con la siguiente: ¿Puede el sistema económico aprender (y por tanto acumular conocimientos, adquirir tecnologías) de su relación con el capital natural?

Estas consideraciones pueden permitir una –necesaria- modificación de la definición de capital natural para que incluya el contenido tecnológico proveniente del capital natural; y la definición de “conocimientos”, ampliándola de tal manera que no se reduzca simplemente a los generados por los humanos.

6.4 Bioinspiración, biomimética y bioutilización: un análisis de los tres tipos de aprendizaje desde el capital natural

La observación de los organismos naturales está ligada en no pocas ocasiones a la “inspiración”, que generalmente da paso a la observación sistemática y a la emulación tecnológica: el hecho de proveer una idea acerca de una posible solución a un problema técnico dado, es en sí mismo un servicio de gran importancia, puesto que se trata de una idea que en el ámbito humano, originalmente, no existía. La relación de copia entre naturfactos y artefactos existe, aunque, como hemos visto, es más pertinente, desde el punto de vista mecánico, hablar del fenómeno de Bio - emulación.

En este apartado se analiza el proceso de aprendizaje desde el capital natural en dos niveles; en primer lugar, a partir de la consideración de treinta ejemplos de tecnologías humanas basadas en tecnologías naturales, correspondientes a procesos de bioinspiración, biomimética y bioutilización, para lo cual se presenta un diagrama de Venn que permite la clasificación de los naturfactos, separando aquellos casos en los que se asocian a un tipo de aprendizaje, de aquellos en los que se solapan dos o tres modalidades. La tabla 8 resume el método de análisis empleado, el cual incluye la revisión documental y la verificación del origen de cada producto, servicio o tecnología basado en un referente natural en la patente correspondiente, las evaluaciones técnicas realizadas por autores diferentes al inventor, innovador o empresa, la declaración personal realizada por el inventor, innovador o la empresa creadora, al igual que la publicidad disponible

acerca del producto (adicionalmente se cuenta con documentación para cada caso, incluyendo imágenes y videos).

Tabla 8. Parámetros metodológicos para el análisis de tecnologías humanas basadas en tecnologías naturales.

FUENTE DOCUMENTAL	DESCRIPCIÓN	ACTOR
Patente	Derecho de Propiedad Intelectual	Inventor
Análisis técnico	Artículo-Libro Publicación Científica-Página Web científica o analítica	Inventor, Creador, Autor, Analistas, Críticos.
Declaración personal	Entrevista, Página Web, Artículo de Prensa, Publicación Científica	Inventor, Creador, Autor.
Prensa – medios de comunicación	Artículo de prensa	Inventor, Creador, Autor, Analistas, Divulgadores.
Publicidad	Página Web (Empresa, grupo de investigación, Creador, inventor)	Inventor, Creador, Autor, Analistas.
Video	Película (en diversos formatos)	Inventor, Creador, Autor, Empresa

Fuente: Elaboración del autor

Este ejercicio se fundamenta en el análisis realizado a las treinta tecnologías documentadas, las cuales se encuentran listadas en la tabla 9, en la cual se especifican para cada caso: el producto, servicio o tecnología, la empresa que la ofrece en el mercado, el innovador y/o inventor correspondiente, una descripción de la tecnología y el aprendizaje específico desde el capital natural del cual se benefició.

Tabla 9. Tecnologías basadas en el aprendizaje desde el capital natural

No.	PRODUCTO, SERVICIO O TECNOLOGÍA	EMPRESA, INNOVADOR O INVENTOR	DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL NATURAL
1	Baleen Filters	Baleen Filters	Sistema de filtración de agua	Filtración de agua por medio de las barbas en algunas especies de ballenas.
2	Joinlox	Joinlock Pty. Ltd.	Método para sellar mecánicamente piezas entre sí	Adherencia de las almejas y otras conchas marinas a las rocas
3	PAX Scientific	PAX Scientific	Mezcladores, ventiladores, turbinas para equipos industriales	Movimiento en espiral observados en los fluidos naturales
4	Platelet Technology™	Brinker	Material para sellar de fugas	Detección y control del sangrado en una herida por medio de las plaquetas (trombocitos).
5	Aeroplano	Otto Lilienthal y Hermanos Wright	Vehículo aéreo con alas fijas e impulsado por uno o más motores	Vuelo de las aves
6	REGEN Energy	REGEN Energy	Controladores para optimizar el uso de electricidad	Comunicación y coordinación según "la lógica del enjambre" de las abejas.
7	Solar Sailor	SolarSailor	Paneles solares para vehículos marinos	Captación de radiación solar a través de las alas por parte de algunas especies de insectos (libélula).
8	Speedo Fastskin®	Speedo	Trajes de baño	Natación aerodinámica empleando dentículos dérmicos en la piel (tiburón).
9	Sierra para cortar madera	Joseph Buford Cox (Oregon)	Herramienta para cortar madera e incluso otros materiales	Forma (mandíbula) y función (corte de madera) de las larvas de los escarabajos (<i>Ergates spiculatus</i>)
10	Sycamore	Sycamore Technology	Ventilador de techo	Movimiento aerodinámico de la semilla del árbol del sicomoro al caer

Continúa en la página siguiente

No.	PRODUCTO, SERVICIO O TECNOLOGÍA	EMPRESA, INNOVADOR O INVENTOR	DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL NATURAL
11	Erlus lotus	Erlus	Tejas de arcilla autolimpiantes	Estructura de microrelieve de la hoja del loto sagrado.
	LotusanPaint	Sto Corp	Recubrimiento de pintura auto –limpiante	
12	Eastgate Center Building	Arquitecto Pearce y Associates	Mick Arup Centro comercial con refrigeración natural ubicado en Harare, Zimbabwe	Diseño de los montículos de las termitas africanas (<i>Macrotermes michaelseni</i>).
13	ORNILUX	Arnold Glas	Vidrio para evitar la colisión de aves en las ventanas	Reflectancia de las telarañas de algunas especies de arañas.
14	Shinkansen Train	Japan Railways Group	Tren de alta velocidad menos ruidoso	Diseño aerodinámico del pico del pájaro Martín pescador (<i>alcedo atthis</i>) y vuelo silencioso de los búhos.
15	Vortex Generator	Watreco	Tecnología para purificación de agua	Estabilidad dinámica de la trucha cuando nada contra la corriente.
16	Whalepower	WhalePower	Turbinas de viento con anatomía de aleta de ballena	Protuberancias en las aletas de las ballenas jorobadas.
17	Velcro	Velcro USA Inc	Sistema de cierre y adhesión	Adherencia de los cardos <i>Arctium</i> .
18	Stabilitech technology	Stabilitech Ltd.	Almacenamiento y manipulación de vacunas y biofármacos sin refrigeración	Principio de anhidrobiosis o capacidad de vivir sin agua (<i>artemia</i> , y <i>tardígrados</i>).
19	Norian SRS	Cement Norian	Cemento de secado rápido en huesos fracturado por inyección	Crecimiento de los esqueletos de los corales en la formación de arrecifes.
20	La alambrada	Michael Kelly y Joseph Glidden	Estructura de alambre para delimitar terrenos, encerrar ganado etc.	Forma y función de las espinas en las plantas (<i>naranja de Osage</i>).

Continúa en la página siguiente

NO.	PRODUCTO, SERVICIO O TECNOLOGÍA	EMPRESA, INNOVADOR O INVENTOR	DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	APRENDIZAJE DESDE EL CAPITAL NATURAL
21	Aquaporin	Aquaporin	Membranas para filtración de agua	Uso de las acuaporinas (transporte de agua a través de las membranas celulares).
22	Biopolymers Nanochem	Biopolymers Nanochem	Polímeros biodegradables a base de proteínas solubles en agua.	Segregación y moldeado del carbonato de calcio de las ostras en su caparazón.
23	Byetta® exenatide	Amylin Pharma y Lilly USA, LLC.	Medicamento inyectable para control la diabetes mellitus tipo 2 en adultos	Compuesto extraído de la saliva del monstruo de Gila (Heloderma suspectum)
24	Biodome	Wastewater Compliance, Inc.	Sistema de tratamiento de aguas residuales	Uso de bacterias y microbios simbióticos para degradar desechos
25	Mushroom™	Ecovative Design	Material para embalaje	Uso del micelio del hongo Basidiomycete como polímero natural
26	Estatinas	Varias Farmacéuticas	Fármacos para la reducción del colesterol	Compuesto extraído de varios hongos (Aspergillus terreus, Nocardia autotrophica)
27	Polinización	Agricultores	Proceso de transferencia del polen hacia la producción de semillas y frutos.	Aprovechamiento agrícola de la polinización (abejorros, abejas, avispa, mariposas, etc.)
28	Control biológico de plagas	Agricultura	Uso de organismos vivos como depredadores naturales de otros organismos considerados plagas.	Aprovechamiento agrícola del control biológico de plagas
29	Taxol	Bristol Myers, Sanofi-Aventis	Fármaco anticancerígeno	Compuesto extraído del árbol tejo del Pacífico (Taxus brevifolia).
30	Medicamentos de origen marino	Varias farmacéuticas	Fármaco anticancerígeno, Suplemento nutricional, Antivirales, Desinflamatorio, analgésico, Pruebas etc	Compuesto extraído de Esponjas Marinas, Caracoles, Medusas Microalgas, Gorgonáceos, Corales entre otros.

Fuente: Elaboración del autor

6.5. Inclusión, Separación y Superposición de los tipos de aprendizaje desde el capital natural: Un análisis a partir del Diagrama de Venn.

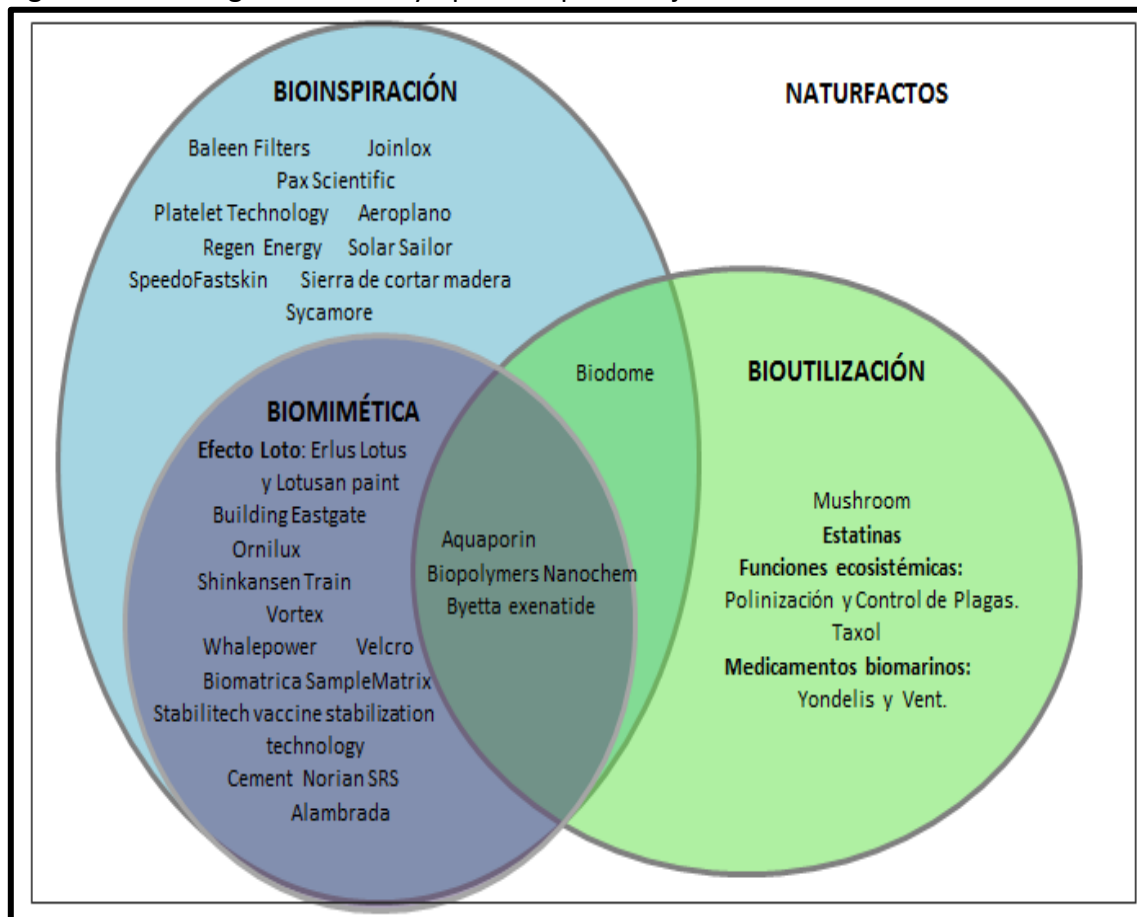
Una manera útil de clasificar las tecnologías humanas dentro de estas tipologías de aprendizaje, considerando las características señaladas, es el empleo del diagrama de Venn, propuesto por Rawlings et al. (2012), debido a que este diagrama hace posible la representación y clasificación de cada una de las tecnologías consideradas aquí en la tipología de aprendizaje correspondiente (bioinspiración, biomimética, bioutilización) e igualmente permite las relaciones de intersección (tecnologías que se superponen en distintos tipos de aprendizaje) e inclusión (por ejemplo, todas la tecnologías biomiméticas son bioinspiradas).

Desde el punto de vista de la valoración de la importancia del aporte de la naturaleza en los desarrollos tecnológicos humanos, el diagrama de Venn puede representar grados diferentes de aporte de la naturaleza a los procesos económicos de innovación, los cuales eventualmente deberían ser compensados en relación a la dependencia que el sistema económico ha desarrollado respecto al ecosistema natural; mayor en aquellos en los que se superponen los tres tipos de aprendizaje y menor en los que se superponen dos, uno o ninguno. A manera de ilustración, consideremos el hecho de que, el proceso de tomar ideas desde la observación de la naturaleza es diferente al de replicar sus procesos y mecanismos, y esta última modalidad guarda mayor dependencia con la naturaleza. Pero en aquellos casos en los que se produzca una superposición de ambos procesos (bioinspiración y biomimética), la relación de dependencia, o la contribución realizada por la naturaleza, serán mayores aún.

El diagrama de Venn propuesto, contiene tres conjuntos que representan los tipos de aprendizaje desde la naturaleza: bioinspiración (óvalo azul), biomimética (óvalo violeta) y bioutilización (óvalo verde). Dentro de estos conjuntos se encuentran las treinta tecnologías humanas analizadas respectivamente para estos tipos de aprendizaje natural. En los casos en los que existe una relación de intersección entre los conjuntos, estas tecnologías suponen la interacción simultánea entre dos o más tipos de aprendizaje desde la naturaleza. A manera de ejemplo puede recordarse que la biomimética es un subconjunto de la bioinspiración, y esa es la razón por la que el óvalo violeta está dentro del óvalo azul. Así también, tecnologías como el Bio-dome están clasificadas, de manera simultánea, como bioinspiradas y bioutilizadas, sin que ello implique que son biomimética, razón por la cual se encuentra en la intersección entre el óvalo azul y el verde. Y existen ciertas tecnologías que representan los tres tipos de aprendizaje (Aquaporin, Purebond®

technology, entre otras) y éstas implican una mayor dependencia o interacción con los sistemas biológicos (ver figura 9).

Figura 9. Tecnologías humanas y tipos de aprendizaje desde la naturaleza.



Fuente: Elaboración del autor basado en Rawlings et al. (2012).

También es relevante clasificar los naturfactos en sus distintas modalidades porque es necesario diferenciar con claridad entre las diversas acepciones que han adoptado el concepto de biomimética y sus asociados. En la actualidad, con la divulgación de la biomimética, y particularmente con la asociación y uso del concepto de “biomimicry”, algunas tecnologías humanas que se clasifican como inspiradas o emuladas de las tecnologías naturales parecen no tener relación verificable entre ellas. En este punto, Vogel (2000) plantea que, examinados de cerca, técnicamente, los casos que se reclaman como representativos de la biomimética no son auténticos éxitos e incluso, muchos autores indican que el uso del término biomimético se ha utilizado inapropiadamente con fines comerciales (pueden consultarse al respecto los casos del traje de baño Speedo Fastskin y las tecnologías de la compañía Pax scientific, por ejemplo).

Igualmente existen casos de intentos de copia o transferencia desde la naturaleza que, al no ser exitosos, no pueden considerarse propiamente biomiméticos (al respecto puede ser ilustrativa la revisión del caso de la tecnología del aeroplano, por ejemplo). En aquellos casos en los que tal intento es exitoso temporalmente (tal es el caso de la tecnología de enfriamiento derivada de las termitas) pero que en un determinado periodo de tiempo, en relación al conocimiento disponible y a la luz de los avances científicos, pueden dejar de considerarse biomiméticos.

A manera de síntesis, puede decirse que el análisis de las trayectorias de las tecnologías presentadas indica que:

- Existen tres tipos de aprendizaje (bioinspiración, biomimética y bioutilización) desde la naturaleza que caracterizan el proceso de transferencia de conocimiento tecnológico desde los ecosistemas naturales hacia el sistema económico humano.
- Estos tipos de aprendizaje con frecuencia se presentan de manera simultánea (se superponen) en el desarrollo de tecnologías, productos, y/o servicios.
- Los tipos de aprendizaje aparecen en secuencias que no guardan siempre el mismo orden; por ejemplo: unas veces aparece la bioinspiración seguida la biomimética (Eastgate Centre), otras la bioutilización está seguida de la biomimética (alambrada), etc.
- Las aproximaciones biomiméticas constituyen un subconjunto de la bioinspiración, en el sentido que toda emulación de la naturaleza se produce porque se observan ciertas características naturales deseables para el desarrollo de la tecnología humana.

Estos casos, en su conjunto, nos muestran que el proceso de transferencia conocimientos desde las tecnologías naturales a las tecnologías humanas se ha constituido como un factor imprescindible en el proceso de innovación tecnológica humana, en el cual se verifica diversas modalidades (biomimética, bioinspiración, bioutilización) pertenecientes a lo que hemos denominado “aprendizaje desde el capital natural”, y con ello, podemos discutir la intensidad o la modalidad en la que ocurre esta interacción entre tecnologías naturales y humanas.

6.6. Conclusiones y discusión final

- El capital natural, puede considerarse como una especie de fuente primaria de innovaciones, a manera de “primer inventor” o “primer innovador” o también “agente innovador” que participa, junto a otros agentes en el proceso de búsqueda de soluciones tecnológicas.
- La sostenibilidad, en principio, debería incluir como uno de los objetivos de política económica ambiental, la preservación de las capacidades de invención e innovación inherentes al capital natural. surge la pregunta de ¿qué tipo de políticas específicas son recomendables, una vez se reconoce este objetivo? los naturfactos son una evidencia de la existencia de conocimiento en la naturaleza, y una prueba de la existencia necesaria de procesos de aprendizaje relacionados con este conocimiento en particular.
- Cuando estudiamos el papel de los conocimientos en los procesos de crecimiento económico, generalmente no hacemos la distinción entre la parte proveniente del capital natural, ni de la relación economía-medioambiente.
- Los naturfactos (tecnologías naturales) y los artefactos (tecnologías humanas) son dos tipos específicos de productos que se originan en diferentes tipos de agente (natural, humano), y hacen parte de un proceso tecnológico conjunto.
- El hecho de asumir que el capital natural es una fuente de innovación tecnológica implica, en principio que; el capital natural es más que un agregado de recursos naturales que sirven como fuente de inputs y receptáculo de desechos. Debe ampliarse la caracterización del concepto de capital natural, de tal forma que no sea reducido a un papel pasivo (principalmente como límite ecológico al proceso de desarrollo económico y como un activo que, esencialmente solo se degrada en el tiempo). Deben reconocerse sus aportes al proceso de innovación y aprendizaje.
- cuanto al capital natural reconocido como agente participante en el proceso de invención-innovación, surge una pregunta: ¿cuál es el sistema adecuado de compensación? ¿un sistema de patentes, de derechos de propiedad, de propiedad pública o privada?
- Es posible la clasificación de los naturfactos respecto del tipo de modalidad de aprendizaje desde el capital natural que les dio origen. Un análisis a partir del Diagrama de

Venn hace posible, además, comprender la ocurrencia de procesos de inclusión, separación y superposición de los tipos de aprendizaje desde el capital natural.

- el análisis de las trayectorias de las tecnologías presentadas indica que los tipos de aprendizaje aparecen en secuencias que no guardan siempre el mismo orden y que las aproximaciones biomiméticas constituyen un subconjunto de la bioinspiración, en el sentido que toda emulación de la naturaleza se produce porque se observan ciertas características naturales deseables para el desarrollo de la tecnología humana.

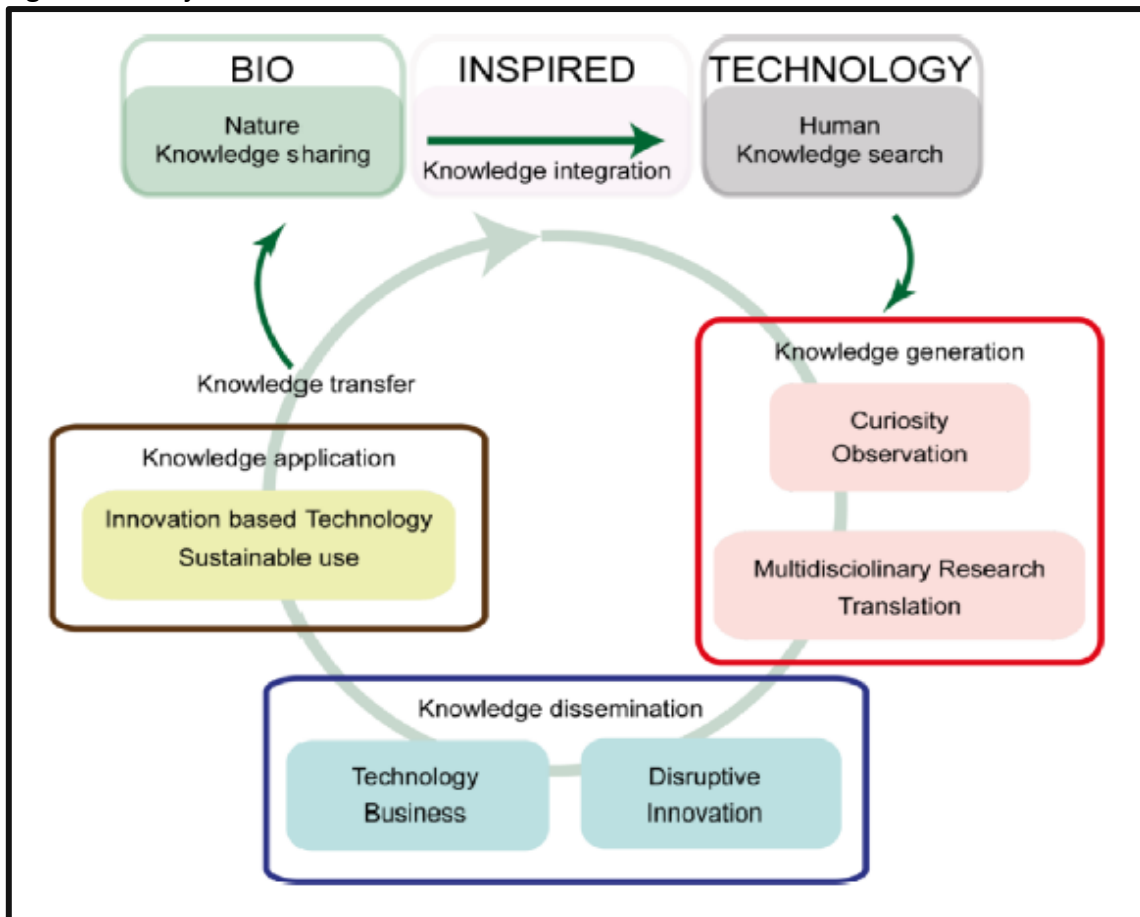
CAPÍTULO VII

El Aprendizaje Del Capital Natural A Través De La Bioinspiración

7. El Aprendizaje Del Capital Natural A Través De La Bioinspiración

La bioinspiración como fuente de conocimientos tecnológicos provenientes de la naturaleza puede ser entendida fundamentalmente como una aproximación humana hacia el entorno natural en el que, la información obtenida desde el entorno natural o la comprensión de algún aspecto fundamental de alguna actividad biológica permite la creación de productos a los seres humanos (Hank y Swieger 2012). La bioinspiración constituye, pues, una estrategia de creación, de diseño de productos fabricados por los humanos a través de la adaptación de funciones y mecanismos presentes en la naturaleza que resulta útil para resolver problemas tecnológicos concretos, el cual emplea como recurso creativo fundamental la analogía (Vattam et al. 2009). Las tecnologías basadas en la bioinspiración son el resultado de un proceso de integración de conocimientos presentes en la naturaleza, los cuales son compartidos con los seres humanos en su búsqueda de soluciones tecnológicas, en el cual pueden identificarse diversas etapas (generación, diseminación, transferencia, configurando, así, un flujo de conocimiento que alimenta el proceso innovador, tal y como se ilustra en la figura 10.

Figura 10. Flujo de conocimiento e innovación



Fuente: (Rebouillat y Lapray 2014: 307)

La bioinspiración constituye la primera de las formas de conocimiento desde el capital natural que abordaremos en extenso a través del análisis de productos desarrollados por los humanos, derivados del aprovechamiento de las soluciones tecnológicas observadas en la naturaleza las cuales se constituyeron en factor clave para los individuos o equipos creadores de novedosas soluciones que han conseguido un impacto importante para la economía y la sociedad humanas. En lo que sigue, se detallan casos en los que las aves, los tiburones, los moluscos, las ballenas, los remolinos (entre otros) sirvieron como referentes biológicos relevantes para la consolidación de tecnologías humanas.

7.1. La confluencia de la bioinspiración y la biomimética en el aeroplano

La influencia de las tecnologías naturales en el desarrollo de tecnologías e innovaciones humanas puede evidenciarse a través del análisis de la evolución del aeroplano, el cual consideró procesos de bioinspiración y biomimética en diversas etapas de su trayectoria. Anderson (2002:28) señala que tanto la tecnología como el concepto moderno de aeroplano consisten esencialmente en una máquina con alas fijas, un fuselaje con cola y un mecanismo de propulsión separado.

Los diseños iniciales de aeroplanos o de máquinas de volar, estuvieron inspirados en la observación sistemática del vuelo de los pájaros y en la idea de imitarlos. La historia de los diseños de máquinas voladoras se remonta cuando menos al siglo XV con los diseños elaborados por Leonardo Da Vinci en el año de 1490; con los cuales se creó la idea de un avión con alas batientes, que se sostiene y avanza gracias a que sus alas ejecutan movimientos parecidos a los de las aves, a estos aparatos se les llama Ornitópteros.

Un momento decisivo para la consolidación de la tecnología del aeroplano, se dio con realización del primer vuelo tripulado y sostenido por parte de Otto Lilienthal en el año de 1891, como resultado de sus diseños, experimentos, pruebas y aportes técnicos a la aerodinámica. Este primer vuelo humano exitoso permitió comprobar que las alas curvadas eran superiores a las alas planas gracias a los datos e información recopilados por Lilienthal, quien contribuyó igualmente con los llamados “coeficientes aerodinámicos” o “tablas de Lilienthal”.

La trayectoria de Lilienthal es una perfecta ilustración de los alcances que puede tener la inspiración ofrecida por la naturaleza cuando ésta se complementa con habilidades y conocimientos de naturaleza técnica. La obra maestra de Lilienthal “El vuelo de los pájaros como base de la aviación” publicada en el año 1889 es una evidencia de la relación entre los estudios científicos del inventor y su intento por comprender el funcionamiento del vuelo en las aves con el propósito explícito de transferir ese conocimiento adquirido al diseño de una tecnología humana de vuelo. De hecho, ese mismo año, produjo diseños derivados de estos estudios científicos que intentan replicar el vuelo de las aves, como

queda evidenciado en sus modelos de ornitópteros. A manera de ejemplo, puede considerarse el diseño de un ornitóptero denominado “Seagull” basado en su detallado estudio de la gaviota. A través de un proceso de permanente retroalimentación entre sus datos, pruebas de vuelo y diseños produce -dos años después- el planeador “Derwitzer”.

El trabajo de Lilienthal es representativo de los dilemas que ha enfrentado el proceso de innovación con frecuencia: Lilienthal diseñó tecnologías de vuelo de alas batientes - ornitópteros- y también de alas fijas. Hoy se sabe que la tecnología más apropiada para el desarrollo del aeroplano fue la de alas fijas. Paradójicamente, a partir de su convicción personal y de sus estudios, este diseñador alemán sostuvo que los ornitópteros eran la tecnología más apropiada para el futuro de la aviación.

Históricamente, hasta este punto, es innegable que el surgimiento de la tecnología del aeroplano tiene un origen bioinspirado, ya que sin la observación y estudio sistemático del vuelo de las aves no habría sido posible el desarrollo del aeroplano. Pero la discusión acerca de la consolidación definitiva de la tecnología del aeroplano moderno plantea el interrogante de si esta tecnología es o no biomimética.

Por una parte, se encuentra el conjunto de autores que plantean que el aeroplano es un aparato bioinspirado pero que no constituye un ejercicio biomimético, entre ellos Vogel (2000), quien plantean que precisamente el diseño eficiente de ala fija, es la característica que hace que el vuelo del aeroplano moderno no sea una copia de la tecnología natural del vuelo de las aves, por lo que para este autor, el aeroplano es un aparato bioinspirado pero no un ejercicio biomimético. La consideración del caso de Lilienthal permite realizar algunos contrastes sobre ese punto de vista puesto que este inventor (Lilienthal) es uno de los pioneros de la tecnología de ala fija que es precisamente una solución claramente diferenciada del vuelo de ala batiente de las aves, y podría decirse por tanto, que con él comienza realmente la trayectoria tecnológica paralela, en la que los humanos no requieren de diseños biomiméticos para sus desarrollos tecnológicos.

Otros autores como Drack y Gebeshuber (2013) manifiestan que el trabajo de Lilienthal sirve como un buen ejemplo de biomimética, porque incluye aspectos como la abstracción, la transferencia, y la aplicación del conocimiento generado desde los modelos biológicos, a tal punto que lo consideran como representativo de la definición de biomimética asumida por Asociación de Ingenieros Alemanes “Verein Deutscher Ingenieure VDI”.

Precisamente es esta discusión la que indica lo compleja que puede ser la distinción entre lo biomimético y lo bioinspirado, o la diferenciación entre la tecnologías biomiméticas y las que no lo son; puesto que es un hecho que los diseños exitosos de aeroplano a partir de los hermanos Wright no emplearon la tecnología de alas batientes de las aves, establece una relación de bioinspiración entre la tecnología natural y la tecnología

humana de vuelo; pero igualmente es cierto que el éxito de los hermanos Wright se debe en parte al uso de los coeficientes aerodinámicos contenidos en las tablas de Lilienthal, lo que igualmente indica una cierta transferencia de conocimiento derivado del diseño natural para lograr resolver los desafíos técnicos que enfrentaban estos diseñadores.

Por lo tanto, es indiscutible el origen bioinspirado de la tecnología humana de vuelo pero es discutible que se haya producido una plena relación biomimética con la tecnología natural, y los diseños posteriores de aeroplanos guardan una gran diferencia en términos de sus características técnicas frente al vuelo de las aves. Ello implica diferentes etapas del desarrollo de esta tecnología, iniciando con la bioinspiración (diseños de Da Vinci), continuando con la confluencia de la bioinspiración y la biomimética (Otto Lilienthal-hermanos Wright), pasando a una separación radical de las trayectorias tecnológicas (hermanos Wright y diseños posteriores), y finalmente con una etapa de biomimética deliberada en la que se intenta una transferencia sistemática de conocimientos tomados del vuelo de diversas especies naturales como pájaros, moscas, libélulas, entre otras. Además algunos científicos, desde la biomimética deliberada, continuaron desarrollando la idea de Lilienthal de volar como lo hacen las aves (Park y Yoon 2008).

7.2. Filtración de residuos sólidos inspirada en las ballenas: Baleen Filters.

Los sistemas naturales de filtración de partículas empleados en el proceso de alimentación por parte de algunas especies marinas tales como: Ballenas Jorobadas, Tiburón Ballena, Sábalo de Molleja, Carpa Dorada, entre otros; han llamado la atención de científicos y empresarios innovadores debido a la eficiencia de estos sistemas y la variedad de alternativas desarrolladas por dichas especies.

Por un lado, algunos científicos han encontrado convergencia entre la tecnología natural de filtrado propia de peces como la Carpa Dorada y la tecnología humana de filtración desarrollada por la industria de bebidas, las cuales tienen en común el uso del principio de filtrado de flujo cruzado (crossflow filtration). Dicha tecnología se emplea para producir vinos, cervezas y jugos de frutas. Este tipo de filtración se produce cuando el fluido o el líquido que debe filtrarse fluyen en paralelo a la superficie que sirve como filtro, en vez de dirigirse directamente hacia ella y es empleada por los peces para remover del agua pequeñas cantidades de alimento (zooplancton, fitoplancton); y es utilizada en la industria de bebidas para rechazar partículas y obtener un líquido libre de residuos sólidos.

Tres hechos importantes deben ser destacados. En primer lugar, tanto la tecnología humana como la tecnología natural han aprovechado en la práctica, la eficiencia de un principio natural como lo es la filtración por flujo cruzado, lo cual representa un caso de convergencia entre los dos tipos de tecnología. En segundo lugar, la tecnología humana aplicada en procesos de la industria de alimentos no se ha inspirado, ni ha realizado

transferencia de conocimiento de la tecnología natural de filtración. En tercer lugar, la tecnología humana de filtración de flujo cruzado se ha empleado durante décadas en procesos industriales pero no se han descubierto los mecanismos físicos subyacentes, es decir, no se cuenta aún con una explicación científica plena de su funcionamiento (Brainerd 2001:387).

De otro lado, una tecnología humana que si representa un proceso de bioinspiración a partir de la observación de sistemas de filtración propios de especies de ballenas (azul y jorobada), es el sistema de filtración Baleen Filters, el cual es un producto que permite filtrar partículas suspendidas y sedimentos presentes en las aguas residuales y ha sido aplicado en el procesamiento de alimentos, la industria minera, el tratamiento de aguas residuales municipales, el riego; entre otras. Este producto surge de un programa de investigación y desarrollo de la Universidad de Australia del Sur iniciado en el año de 1995, durante cinco años estuvo en proceso de pruebas, patentado en el año de 1998 y finalmente, lanzado al mercado por la empresa Baleen Filters Pty Limited en el año de 1999.

El ingeniero Yuri Obst, quien hizo parte del programa de investigación y desarrollo en la Universidad de Australia y ahora se desempeña como director administrativo de la empresa, explica que el flujo de agua contaminada ingresa al sistema de filtración en el cual es sometida a un proceso en el que se combina la alta presión y un atomizador de bajo volumen, el primero (la alta presión) desaloja el material que permanece atrapado en la membrana de filtración, mientras que el segundo (atomizador de bajo volumen) remueve el material hacia la parte exterior del filtro, lo cual le permite realizar este proceso de descontaminación de manera continua y sin interrupción. La tecnología permite separar materia orgánica e inorgánica del agua de un tamaño de 25 micrones y acoplado con sistemas complementarios puede aumentar su capacidad para capturar partículas de un tamaño menor a 5 micrones (Obst 2007:9). Los reportes de test de desempeño técnico realizados a esta tecnología en su aplicación a diversas industrias (vino, residuos municipales, procesamiento de alimentos, curtiembres, entre otros) muestran su eficiencia en relación al bajo consumo de energía y químicos; a manera de ejemplo puede consultarse el estudio correspondiente a empresas de productos cárnicos (Baleen Filters 2007).

En el artículo titulado Industrial Wastewater filter Technology inspired by Nature, Malcom Condon, representante de la empresa, sostiene que la tecnología de filtración desarrollada por Baleen es una adaptación del mecanismo natural desarrollado por las ballenas:

“La palabra 'barbas' (Baleen) es una descripción anatómica de la ballena que pertenece al grupo de ballenas que se alimentan por filtración. Las barbas son esencialmente el mecanismo de filtro que permite a la ballena recoger plancton,

peces pequeños y otros organismos marinos del flujo del agua durante la alimentación. La combinación del movimiento de barrido de la lengua y la reversión de los flujos de agua mientras realiza la inmersión y regresa a la superficie, permite (a las ballenas) capturar y filtrar el alimento, y después limpiar sus barbas antes de la siguiente inmersión. La tecnología Baleen Filter es una adaptación de esta técnica natural utilizada por las ballenas para mantener sus barbas limpias y libres de depósitos a largo plazo” (Condon 2003:18).

Desde el punto de vista científico, los estudiosos del mecanismo de alimentación por filtrado de las ballenas han encontrado que los misticetos (Mysticeti) ó cetáceos con barbas, se caracterizan por tener barbas (baleen) en lugar de dientes funcionales dentro de su boca. Cada lámina de barbas consta de pelos largos y flexibles unidos por tejidos encajados en la encía superior. Cientos de láminas, una al lado de la otra, se alinean a cada lado de la mandíbula superior, colgando hacia abajo. Cuando la ballena abre la boca, el agua y la comida entran en ella, después la boca se cierra parcialmente mientras que la lengua se expande para sacar el agua, los alimentos quedan atrapados en las barbas para finalmente ser engullidos y digeridos. De esta manera, las ballenas se alimentan filtrando gran cantidad de presas muy pequeñas y poblaciones densas de planctón o pequeños animales marinos por medio de sus barbas. Las diferentes especies de ballenas barbadas difieren en la forma de las barbas y la finura de las láminas. Esto refleja los diferentes estilos de alimentación y tipos de alimentos: barbas cortas con una lámina gruesa describe a una ballena que se alimenta de peces; láminas largas con flecos sedosos permiten cazar animales más pequeños como el zooplancton¹³.

En el campo de la biomecánica, se ha avanzado en el entendimiento del proceso de filtración alimenticia de las ballenas. Werth (2004) desarrolló un modelo matemático y físico del mecanismo de filtración de las ballenas llegando a la conclusión de que las ballenas jorobadas combinan al interior de su boca efectos hidrodinámicos y de presión hidráulica, los cuales se aplican al flujo de agua, mientras realizan sus actividades de alimentación, permitiendo alcanzar una alta eficiencia, en términos de filtración de alimento.

Algunos autores, consideran la tecnología Baleen Filters como representativa de un proceso biomimético. Al respecto puede consultarse Harman (2013:103-104). Adicionalmente, Dama-Fakir et al. (2012) realiza un análisis de los intentos de aprovechamiento de los modelos naturales para generar innovaciones que ofrezcan soluciones en el tratamiento de agua y encuentran que la tecnología de Baleen es la única aplicación exitosa desde el punto de vista biomimético:

¹³ Véase información detallada acerca de diversas especies de ballenas y sus características biológicas y alimentarias en el Centro de Estudios Costeros de Provincetown, el cual tiene uno de los programas de investigación y monitoreo más completos sobre poblaciones de ballenas jorobadas en <http://www.coastalstudies.org/what-we-do/stellwagen-bank/baleen-whales.htm>

“Una amplia gama de organismos filtran el agua para obtener los nutrientes para su alimentación. La filtración se consigue a través de varios principios. Hasta el momento (de este estudio), Baleen Filter era la única aplicación de filtración biomimética exitosa identificada, sin embargo se prevé que investigaciones posteriores sobre los principios discutidos en esta sección pueden dar lugar a diseños de filtro innovadores en el futuro” (Dama-Fakir et al. 2012:4).

Si considera que una diferencia fundamental entre la bioinspiración y la biomimética es la transferencia de mecanismos o procesos desde la naturaleza, el caso de Baleen Filter no debe considerarse como un ejercicio propiamente biomimético; esto puede corroborarse a través de la revisión de la patente del producto Obst (2002) denominada: “Filtro de limpieza usando contraflujo” (Filter with Counter Flow Clearing), inicialmente presentada por la Universidad del Sur de Australia, la cual muestra en detalle las características técnicas de esta tecnología de tratamiento de aguas residuales sin hacer mención explícita de estudios o investigaciones precedentes que puedan referenciar la réplica del mecanismo usado por las ballenas. Es decir, que la relación directa entre el mecanismo natural y la tecnología desarrollada por la empresa no se puede verificar a través de la información contenida en la patente, lo cual indica en principio, que la tecnología tiene un origen bioinspirado pero que su carácter biomimético.

7.3. Tecnología de sellamiento basada en los moluscos: Joinlox

El desarrollo de la tecnología de sellamiento Joinlox es una demostración de que la bioinspiración emplea múltiples caminos que permiten conectar las soluciones tecnológicas encontradas en el mundo biológico con las soluciones técnicas relacionadas con necesidades humanas. En este caso, el creador de Joinlox, Dean Cameron, encontró la clave para solucionar un problema de transporte mientras leía a su hijo un libro que describía criaturas marinas. En una entrevista concedida al diario The Australian, Cameron relata como la invención de este producto se inspira en la forma como almejas y otras conchas marinas se adhieren a las rocas¹⁴:

“...la confirmación de la idea vino a mí mientras estaba leyendo un libro acerca de las criaturas marinas a mi hijo a principios de 2006. Estaba intrigado por la forma en que las almejas y otros moluscos fueron capaces de utilizar filamentos - llamados bisos - para adherirse firmemente a las rocas. Fue entonces cuando me di cuenta que estos hilos y su forma cómo funcionan, se podrían utilizar para resolver mi problema de unir plásticos y otros materiales”

¹⁴ Véase la entrevista concedida por Dean Cameron al diario The Australian en la página web <http://www.theaustralian.com.au/archive/business/grabbing-inspiration-from-the-sea-joinlox/story-e6frg9hf-1225857645040>

De esta manera, Cameron descubrió que por medio de cientos de pequeños filamentos, delgados y flexibles, las almejas y los moluscos obtienen una sujeción muy fuerte a las rocas cuando la necesitan. A partir de la inspiración inicial, Cameron identifica como elemento clave en la tecnología de sujeción de las almejas y moluscos, el conjunto de pequeños ganchos que les permiten emplear una gran fuerza de adhesión¹⁵:

“Las almejas y otros mariscos pueden adherirse a las rocas con una fuerza increíble. La forma en que lo hacen es mediante un sistema de bloqueo con muchos "ganchos" pequeños en los extremos de los bisos¹⁶ que se adhieren a las diminutas salientes y hendiduras de las rocas. Literalmente ellos mismos (las almejas y otros mariscos) se encajan en las rocas de tal manera que se tiene que romper la roca para extraerlos. Esto convierte las fuerzas de corte en fuerza de tracción y de flexión precisamente como ocurre en [el diseño de] los pequeños ganchos de las almejas de Joinlox”

En la patente de Osman (2013) denominada mecanismo de conexión (“Connecting mechanism”) se detalla la manera en la que la fuerza de tensión consigue juntar piezas plásticas de manera eficiente, logrando un efecto de adhesión mediante un conjunto de piezas que se unen mecánicamente como ganchos entrelazados. En este caso, el proceso de bioinspiración le brinda un elemento técnico específico (gancho) al desarrollador de la tecnología humana. Sin embargo, tal como lo reconoce Cameron la idea de la tecnología fue inspirada en la observación de la naturaleza; pero la solución tecnológica desarrollada no constituye una transferencia directa o emulación directa de los mecanismos naturales de adhesión de los organismos vivos; a tal punto que, en la patente no se remite de manera concreta a estudios científicos o técnicos relacionados con las almejas u otros moluscos.

De hecho el funcionamiento de los mecanismos biológicos que permiten a este tipo de moluscos una adhesión fuerte es bien conocido desde el punto de vista de la morfología:

“Las especies epifaunales pueden fijarse al sustrato por la secreción de un “cemento” calcáreo que fija fuertemente una de las valvas (epifaunal cementante, por ejemplo ostras) o por filamentos proteicos llamados biso (epifaunal bisado o adherente, por ejemplo mejillones). Para adherirse al sustrato, el animal se asienta con el pie y comienza a liberar secreciones filamentosas, que son producidas por

¹⁵ Véase <http://www.asknature.org/product/0e663bb73680a395ec14d29d02f6a5ae>

¹⁶ Bisos: producto de secreción de una glándula situada en el pie de muchos moluscos lamelibranquios, que se endurece en contacto del agua y toma la forma de filamentos mediante los cuales se fija el animal a las rocas u otros cuerpos sumergidos; como en el mejillón (Real Academia Española 2014 <http://lema.rae.es/drae/?val=bisos>).

una glándula situada en el pie. Estas secreciones, en contacto con el agua, se endurecen y fijan al organismo fuertemente al sustrato” (Vilches et al. 2012:51).

La tecnología natural de fijación de los epifaunales bisados se caracteriza por su funcionamiento en un medio acuático y su procedencia química asociada a secreciones glandulares, en tanto que la tecnología humana desarrollada Joinlox es de material plástico y opera mediante procesos mecánicos.

La tecnología Joinlox consiste en un método para sellar mecánicamente piezas, materiales, estructuras o componentes entre sí, de manera permanente y re-utilizable. Es diseñada por la empresa australiana Joinlox Pty Ltd, que inicialmente creó y utilizó esta tecnología para empaquetar otro de sus productos, llamado Biolytix. La empresa ha usado las capacidades de sellado de Joinlox como componente tecnológico de varios de sus productos, para mencionar algunos: Línea Striplox® (sistema de montajes rápidos), Zipa tank® (sistema de almacenamiento) y Pipelox® (tubería con este sistema de unión). Joinlox es un producto versátil con diferentes aplicaciones en construcción, minería y energía, industria del agua y tratamiento de residuos, embalaje y logística. Desde el año 2010, Joinlox es comercializada con el apoyo de Xstrata Technology, una de las compañías mineras más grandes del mundo, quienes firmaron un acuerdo de licencia mundial, en particular para la línea Zipa tank®, con el propósito de usar tanques modulares en el procesamiento de minerales.

7.4. Bioinspiración basada en la geometría de la espiral: PAX Scientific

La inspiración encontrada por los seres humanos en la observación, la investigación sistemática y la admiración por las estructuras en espiral presentes, de manera prácticamente ubicua en la naturaleza, tanto en niveles microscópicos, como en niveles cosmológicos. Como ilustración de ello, puede citarse el libro clásico acerca de la espiral, “The curves of life” (Las curvas de la vida), escrito por Sir Theodore Andrea Cook (1914), quien identifica, describe y analiza casos de geometría espiralada encontrados en los órganos humanos, las conchas, las nebulosas, diversas especies animales, vegetales, plantas, hojas, así como ejemplos abundantes de espirales artificiales creadas por los humanos, las cuales se remontan a la pre-historia humana, bien sea como ornamento o como elemento arquitectónico.

La compañía PAX Scientific se dedica al diseño de hélices, propulsores y ventiladores, basados en la geometría de la espiral y la dinámica de fluídos. Entre los productos que usan esta tecnología se encuentran PAX Fan (ventiladores), PAX Water Technologies (agua y tratamiento de aguas residuales), PAX Mixer (un mezclador industrial) y PAX Pure (tecnología de purificación de agua basada inicialmente en la desmineralización).

La bioinspiración que inició el proceso de creación de los productos de la compañía ha sido descrita por su fundador Jayden Harman en una entrevista para la red de información “Mother Nature Network”, en la cual revela el origen de la trayectoria de desarrollo de estas tecnologías, a partir de la observación del movimiento de los fluidos en la naturaleza:

“Crecí en la playa en Australia”, dice el inventor Jay Harman. “Pasé la mayor parte de mi tiempo bajo el agua tratando de arponear peces. Me di cuenta de que, cuando me aferraba a las algas marinas para estabilizarme mientras nadaba, ellas se rompían en mi mano. Y sin embargo, permanecían pegadas incluso bajo la más salvaje de las tormentas. A pesar de que el movimiento parece caótico, ellas cambian su forma siguiendo un patrón particular: una formación en espiral. Esas mismas espirales están –literalmente– en todas partes en la naturaleza”. (Grover 2013).

Jayden Harman asumió, como elemento esencial para sus propuestas de desarrollo tecnológico, un patrón básico de la naturaleza cuando se trata de reducir la fricción y arrastre en las estructuras que fluyen. Se trata del movimiento en giro o el movimiento en espirales, en lugar del movimiento en líneas rectas. Harman invoca un “principio” denominado por él como “Streamline Principle”, es decir, el principio de diseñar con formas suaves que permitan un movimiento fácil a través del agua o los fluidos, y lo adaptó para optimizar el movimiento de fluidos, manejar la turbulencia, y reducir la fricción, el consumo de energía, desgaste, ruido y calor; usando “geometrías de flujo natural”; que puede ser utilizada en bombas, ventiladores, hélices, y mezcladores.

El trabajo de desarrollo de productos de Pax Scientific ha sido tipificado, por parte de analistas independientes, como un ejercicio de ingeniería inversa sobre el patrón geométrico asociado a las formas de espiral y remolinos encontradas en la naturaleza, que consigue movimientos de rotación que reduce la resistencia y arrastre propios del contacto con el fluido en el que se mueve¹⁷:

"La ingeniería inversa de esta geometría fue un proceso evolutivo que comenzó con pruebas de la parte interior de las conchas tomadas como modelo de los impulsores. Cuando los resultados fueron prometedores, Harman y su equipo se movieron hacia adelante de una manera más científica mediante el uso de la dinámica de fluidos y el software de modelado por computadora. Harman fue capaz de desentrañar lo que él llama el "principio de diseño con formas suaves de PAX". Este principio se basa en una geometría escalable de curvas compuestas en varios ejes, lo que resulta en una forma orgánica derivada de la Proporción Aurea”.

¹⁷ Véase http://pace.shidler.hawaii.edu/sites/pace.shidler.hawaii.edu/files/bic/BIC_Case_PAX.pdf

El resultado de este proceso es la transferencia de patrones geométricos de la espiral, los cuales constituyen un referente natural representativo de la dinámica de fluidos en fenómenos naturales tales como tornados, remolinos de agua; hacia el diseño de ventiladores, propulsores y hélices.

En la patente denominada Generador de Anillo Vórtice "Vortex ring generator" se expresa claramente el ejercicio de réplica de los patrones matemáticos de la expansión logarítmica característicos de la espiral:

"el objetivo de estas aplicaciones es la duplicación de las líneas de vorticidad que se encuentran en un vórtice de anillo. Para tal propósito, las superficies activas se expanden o contraen de manera logarítmica en cualquier dirección en una sección equi – angular de la Espiral Aurea. Si se toman dos puntos cualesquiera de la superficie de estas superficies activas, van a tener una relación entre sí de aproximadamente 1: 0.618" (Harman: 2).

Entre los beneficios de la tecnología desarrollada por la compañía Pax se destacan:

- Aumento de eficiencia por disminución de ruido, aumento de la producción, disminución de consumo de energía
- Optimización del patrón de flujo a partir de la reducción de la fricción
- La disminución de los costos de fabricación y mantenimiento a través del optimizado de material, la reducción del tamaño del motor.

Respecto de las pruebas o test realizados a estas tecnologías, algunos de los productos de la compañía han sido probados con la colaboración de firmas externas, pueden constatarse las realizadas al tanque de almacenamiento de agua "Pax Water Mixer" con la firma Carollo Engineers en el año 2005¹⁸. Y también al ventilador de evaporación para refrigeración, utilizado por la compañía AO Smith Motor, el cual demostró un desempeño en los test aplicados:

"Los resultados preliminares de las pruebas indican que el sistema evaporador del ventilador PAX producido con AO Smith motor, cuando se compara con el conjunto de evaporadores ensamblados en la actualidad, reduce la potencia de entrada del evaporador en cerca de 23% y el uso total de energía del refrigerador en un 3,9%". (Belko 2008:35).

Desde el punto de vista de las evaluaciones sobre su rol en el mercado, la compañía Pax Scientific ha sido considerada como representativa del desarrollo de nuevos modelos de negocio, orientado hacia la eficiencia energética y ambiental (Boyd 2009); y como un ejemplo de diseño biomimético en tanto que representa un aprendizaje proveniente de la

¹⁸ Véase http://www.paxwater.com/Portals/79614/docs/Case_Study_Carollo_Validation.pdf

naturaleza y su capacidad de generar fluidos con baja fricción, por parte del instituto Biomimicry 3,8¹⁹.

A pesar de que los productos desarrollados por PAX SCIENTIFIC han sido identificados, con frecuencia, como representativos de ejercicios de transferencia biomimética, no se verifica la existencia de un proceso de reproducción de la estructura tridimensional en espiral a partir de seres biológicos específicos o de modelos que, más allá de la lógica geométrica asociada a los números de Fibonacci, expliquen las aplicaciones conseguidas por la compañía (acerca de los modelos que explican la forma de las conchas marinas, puede consultarse el artículo “modelling sea shells”, de Fowler et al. (1992). De otra parte, tal y como lo afirman Li et al. (2007) no existen aún evidencias experimentales de que las espirales de Fibonacci hayan sido reproducidas, de manera sistemática, empleando materiales inorgánicos.

7.5. Localización y sellado de fugas inspirada en el proceso de curación de heridas en los humanos: Platelet® Technology leak sealer

Platelet® Technology hace parte de las tecnologías que toman como referente al propio ser humano para el desarrollo de nuevos productos. La tecnología de Platelet de la compañía escocesa Brinker Technology usa plaquetas mecánicas para localizar y sellar fugas de ductos de las industrias del petróleo y del agua. El proceso consiste en introducir en la tubería a través de una inyección las plaquetas en el flujo del fluido, allí la presión diferencial en la fuga mantendrá el tapón en su lugar contra la pared del tubo hasta que los trabajos de reparación se lleven a cabo. La plaqueta es un dispositivo diseñado para que sea de “freefloating” teniendo en cuenta la velocidad de flujo, la presión, la densidad del producto, diámetro de la tubería, la geometría y tamaño de la fuga²⁰.

La tecnología de localización de fugas y sellado (siglas en inglés ATLLAS) utiliza el fluido en el interior de una tubería para introducir estos dispositivos especialmente diseñados (plaquetas) basados en polímeros para el sitio de una ruptura, mantenidos en posición por el diferencial de presión que actúa a través de ellos. La presión extrema hace que las plaquetas se deformen y se fundan entre sí, conteniendo temporalmente la fuga. Los transmisores minúsculos incrustados en cada plaqueta permiten a los operadores de ductos determinar la ubicación exacta de la falla.

El ingeniero Ian McEwan de la Universidad de Aberdeen se inspiró en la forma en que el cuerpo humano detiene naturalmente el sangrado en las heridas. El inventor tuvo su momento de inspiración mientras leía trabajos de investigación acerca del problema de

¹⁹ Véase <http://biomimicry.net/about/biomimicry/case-examples/energy-efficiency/>

²⁰ Véase <http://www.sciencescotland.org/feature.php?id=7>

fugas en la industria de agua del Reino Unido y se cortó con las hojas de papel, y pensó en cómo el cuerpo humano hace un trabajo excelente al sellar las fugas²¹:

"En realidad estaba leyendo acerca de los problemas de fugas en la industria del agua del Reino Unido, cuando me corté con un pedazo de papel. Sentado allí, sosteniendo el dedo, se me ocurrió que el cuerpo humano hace un excelente trabajo sellando de fugas".

A partir de esta idea, el ingeniero McEwan y su equipo desarrollaron un método para introducir las "plaquetas" artificiales a las tuberías, las cuales son atraídas hacia cualquier fuga para ser sellada, como lo hacen las pequeñas partículas en la sangre llamadas plaquetas al coagular el entorno de un corte para detener el flujo. La concentración de plaquetas es suficientemente pequeña para que la densidad efectiva del fluido no se modifique y el exceso de plaquetas puede ser removido de la corriente usando un sistema de filtro de aguas abajo.

En la naturaleza, las plaquetas funcionan en el proceso de curación de heridas como lo explica de manera clara la Federación Mundial de la Hemofilia²²:

"Las plaquetas son pequeños fragmentos celulares sin núcleo que circulan en la sangre; participan en la formación de coágulos sanguíneos y en la reparación de vasos sanguíneos dañados. Cuando un vaso sanguíneo se lesiona, las plaquetas se adhieren al área dañada y se distribuyen a lo largo de la superficie para detener la hemorragia (este proceso se conoce como adhesión). Al mismo tiempo, pequeños sacos ubicados al interior de las plaquetas y llamados gránulos liberan señales químicas (este proceso es llamado secreción). Estas sustancias químicas atraen a otras plaquetas al sitio de la lesión y provocan su aglutinamiento para formar lo que se conoce como tapón plaquetario (a este proceso se le llama agregación)".

Sin embargo, el inventor de Platelet® Technology señala que la analogía con el cuerpo humano fue solo el primer paso, después él y su equipo tuvo que adaptar esa idea para que funcionara en una tubería a presión. Así lo comenta en una entrevista con BBC News²³:

"La analogía con el cuerpo humano sólo fue el primer momento y luego tuvo que adaptarse para que pudiera funcionar en una tubería a presión".

²¹ Ibídem

²² Véase en la página web de la Federación Mundial de Hemofilia:

<http://www.wfh.org/es/page.aspx?pid=942>

²³ Véase

http://www.royalsoced.org.uk/200_ScotlandsTopInnovatornamedforadvancesinCancertreatment.html

Cuando se realiza la revisión de la patente de Kenneth (2003) denominada Método y sistema de localización de fugas “Leak location method and system” no revela referencias explícitas que permitan verificar el origen bioinspirado de esta tecnología puesto que no se hacen referencias a los mecanismos naturales del cuerpo humano en su proceso de localización, reparación y bloqueo del sangrado.

Adams (2011:11) en su análisis del potencial creativo existente en la aplicación de analogías entre un fenómeno natural y un problema tecnológico, identifica a la tecnología de Platelet® como una aplicación bioinspirada y la compara con la analogía existente entre el teléfono inventado por Alexander Graham Bell y el tímpano humano. Por su parte, Nosonovsky y Rohatgi (2011: 238) catalogan a esta tecnología como una aplicación de superficies autolimpiantes en su calidad de material biomimético. Palmer y King (2008:542) se refieren esta tecnología como una gran oportunidad para el mantenimiento y reparación de las redes de tuberías submarinas. Y agregan que las pruebas realizadas son sorprendentes.

En una evaluación de diferentes sistemas de detección de fugas en oleoductos, realizada por Froushani y Dolati (2009), se concluye que esta tecnología es eficiente tanto desde el punto de vista de la ingeniería del proceso de sellado de fugas como desde el punto de vista económico, al ser una alternativa costo-efectiva:

“Finalmente, puesto que platelet® se despliega de manera remota es una alternativa costo-efectiva. Puesto que no se requiere acceso directo al sitio de la fuga...” (Froushani y Dolati 2009: 12).

Los análisis consultados señalan claramente la inspiración obtenida a partir de nuestra especie para la elaboración de la tecnología Platelet®, la cual constituye un ejemplo de inspiración exitoso entre autoreparación de tejidos y reparación de fugas en tuberías de agua, oleoductos y gaseoductos. La clasificación como tecnología bioinspirada se refuerza en los mismos señalamientos del inventor cuando explica que el modelo del aparato circulatorio humano, fue un primer paso que luego tuvo que experimentar una adaptación y desarrollo específico en las tuberías de alta presión, lo cual implica que su funcionamiento no es el mismo que se da en la naturaleza. Incluso, en el análisis de patente se refuerza esta conclusión ya que no hace referencia alguna emulación del sistema humano de curación de heridas en su innovación.

Dentro de las diferentes aplicaciones en las cuales se ha usado Platelet®, algunas hacen hincapié en la capacidad de sellado mientras que otros pueden destacar la localización de fugas. La especificación exacta del material, que es inerte y no tóxico, es parte de este proceso de diseño y tiene en cuenta los requisitos de resistencia, las condiciones ambientales y la compatibilidad química con el producto que está siendo transportado en la tubería. Algunos casos de aplicación son tratados en Ryan et al. (2007). La tecnología

Platelet® se ha aplicado en tuberías de petróleo y de gas en el Mar del Norte. En el año de 2004, se usó Platelets® para sellar una fuga en la línea de inyección de agua de un pozo submarino en el campo de Foinaven de la empresa British Petroleum BP. Como resultado del uso de esta tecnología, la línea de presión se incrementó en 20 bares y la producción subió significativamente. Si bien en la primavera de 2005, hubo un cierre de operaciones, una vez se reanudaron, la BP continuó usando la tecnología Platelet® para fugas en sus tuberías, al menos en los 19 meses siguientes. De igual forma, Platelet® ha solucionado emergencias de fugas, por ejemplo, en el año 2005 Brinker fue contactado por la compañía petrolera Shell E&P para detectar y detener una fuga en altamar de difícil reparación, la solución se dio rápidamente después de cinco días de tener conocimiento de la emergencia. Para la atención de fugas en gasoductos, la empresa Brinker ha desarrollado especialmente el producto TelepathTM. En el año 2006, se usó este producto por parte de la empresa noruega Norsk Hydro para detener una fuga en el campo de Ormen Lange. La aplicación de TelepathTM permitió localizar, de manera precisa, la fuga a 30km de la costa incluso teniendo en cuenta que el sistema de tubería es de aproximadamente 120 kilómetros de largo.

En tuberías de agua, la compañía Yorkshire Water en el Reino Unido es la primera en probar Platelet Technology en acueducto en el año 2009. Los ensayos demostraron su eficacia y ahora la empresa está utilizando la tecnología, de manera regular. A comienzos de año 2011, Brinker realizó pruebas para detectar y corregir fugas en las tuberías de agua usando Platelet® en la empresa Scottish Water. Los ensayos se llevaron a cabo en tres fugas en las zonas residenciales de Aberdeen y Dundee. Como resultados importantes se destacan: en primer lugar, una reducción en el tiempo que normalmente tomaría encontrar y arreglar una fuga. En segundo lugar, sellar sin interrumpir el suministro de agua. En tercer lugar, Platelet® no tiene efecto sobre las características potables del agua y, por último, evita los costos generados por la excavación en las carreteras²⁴.

7.6. La lógica del enjambre y el control del consumo energético: REGEN Energy Management Solution

REGEN Energy es un sistema de control del consumo de energía integrado por dispositivos individuales que toman de manera autónoma la decisión sobre el uso eficiente de la energía en áreas específicas de un edificio y se la comunican a los demás dispositivos a través de una red de comunicación inalámbrica, lo cual que permite un control coordinado, optimizando el uso de la energía, sin requerir de la supervisión o intervención por parte de operarios. Los creadores de esta tecnología identifican este patrón como el de un sistema de multiagentes que es capaz de generar un comportamiento emergente

²⁴ Véase <http://www.iwapublishing.com/template.cfm?name=w21prodnews280611o>
<http://www.cipr.co.uk/sites/default/files/Yorkshire%20Water,%20Best%20Campaign%20C2%A310k%20and%20Under.pdf>

análogo a la lógica del enjambre o la colmena, siendo el elemento clave para la toma de decisiones en todo el sistema de control un algoritmo.

En su análisis sobre el comportamiento social de los insectos, Leadbeater y Chittka (2007) explican diversas estrategias empleadas por colonias de insectos para alcanzar consensos en sus decisiones partiendo de condiciones individuales en las que los organismos poseen cerebros muy pequeños. Entre las técnicas identificadas por los autores se encuentran el aprendizaje de lo social a través del uso de lenguaje simbólico para la transferencia de información (danza de las abejas) y la comunicación química, entre otras. Y concluyen que los comportamientos sociales de auto-organización más complejos tienen como base procesos de transferencia de información entre individuos muy simples:

“Tal vez el aspecto más valioso, sin embargo, es que una perspectiva de insectos ilustra cuán fundamental un aprendizaje social puede jugar en el estilo de vida de cualquier animal, incluso uno cuyo cerebro es más pequeño que una hierba de la semilla. La cognición compleja puede ser una característica de algunas formas de aprendizaje social, pero algunos de los más complejos, las sociedades de auto-organización la función sobre la base de procesos muy simples de la transferencia de información entre los individuos.” Leadbeater y Chittka (2007:711).

Es precisamente esta idea la fuente de inspiración tomada por los creadores de REGEN Energy, Roman Kulyk y Mark Kerbel, encontrada de la lectura del libro de Steven Johnson *Emergencia: La vida conectada de hormigas, cerebros, ciudades y Software* (Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software), en el cual se propone, en su primer capítulo, la idea de que el comportamiento descentralizado es una de las características esenciales de las colonias de insectos en las cuales el aprendizaje permite que aparezcan comportamientos emergentes sin que exista una autoridad central que dé instrucciones específicas a cada uno de los miembros de la colonia (Johnson 2002:32).

Las fuentes de referencia e inspiración de los inventores son identificadas en el estudio de caso denominado “Trayectoria de innovación para la eficiencia de energía: REGEN Energy”²⁵, las cuales se refieren a dos campos:

- a) Ahorro de energía basándose en la lectura del libro *The Innovator’s Solution* de Clayton Christiansen y Michael Raynor.
- b) Inspiración de los modelos o referentes naturales, la lectura del libro de Steven Johnson, el cual ilustra la manera en la que los sistemas biológicos exhiben la propiedad natural denominada “emergencia”.

²⁵ Véase estudio de caso de la empresa Terrapin Bright Green (dedicada a la estimulación de la innovación biomimética) en : http://www.regenenergy.com/wp-content/uploads/REGEN_Energy_Biomimicry_Case_Study.pdf

Kerbel compartió esas ideas con su socio, y posteriormente generaron un algoritmo el cual está incluido como elemento importante de la tecnología y la patente asociada. Igualmente el análisis de la patente permite verificar que los dos conceptos clave empleados son los de “auto-organización” y “emergencia”:

“La auto-organización es un proceso en el que la organización interna de un sistema aumenta su complejidad sin la guía o la gestión de una fuente externa. Un sistema multiagente es un sistema compuesto por un grupo de agentes que interactúan de acuerdo a reglas definidas para alcanzar una funcionalidad que sería difícil o imposible de alcanzar por agentes que actúan individualmente. La emergencia es el proceso de formación de patrones complejos a partir de reglas simples. La emergencia se describe algunas veces en referencia al comportamiento de "enjambre" o "colmena" mediante un conjunto de dispositivos simples, que actúan como un enjambre, y que pueden exhibir un comportamiento el cual es aparentemente más inteligente y complejo que el comportamiento simple que ha sido programado en los dispositivos individuales” (Kulyk y Kerbel 2009:14)

La empresa se refiere al origen bioinspirado y a la analogía que tiene su sistema con la lógica de enjambres. En un artículo escrito para el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología del Departamento de Comercio de los Estados Unidos de América, titulado Tomando inspiración de la naturaleza (Taking Our Cue From Nature), Roman Kulyk señala que los controladores de consumo de energía EnviroGrid™ fueron diseñados a partir de una analogía con el comportamiento de enjambre y tomando como ejemplo a la naturaleza, en la cual los organismos deciden de manera independiente y autónoma beneficiando tanto a cada organismo como al enjambre:

“Las hormigas y las abejas tienen cerebros muy simples que están programados con un conjunto muy simple de instrucciones. Estas instrucciones permiten a la colonia construir nidos, reunir alimentos y defender [la colonia], sin que aparezca una estructura de liderazgo centralizada...Uno de los principales obstáculos que debe ser superado por parte de los aparatos eléctricos es que no tienen la capacidad de comunicarse directamente entre ellos, y por lo tanto no pueden orquestar su uso de energía de forma simple y ventajosa para toda la red. Para superar esto, un análogo de la emergencia o el comportamiento de enjambre puede implementarse en los aparatos eléctricos” (Kulyk 2009:2).

En su análisis de las trayectorias de inventores en el campo de las tecnologías limpias, Hamilton (2011:131-133) señala que en el caso de Mark Kerbel y Roman Kulyk, se tomaron lecciones provenientes de la naturaleza, encontrando la solución a un problema tecnológico, compartiendo la misma lógica que usan las abejas para solucionar sus propios problemas específicos.

Por otra parte, distintas pruebas y evaluaciones implementadas a esta tecnología indican su eficacia para lograr un control óptimo en el consumo energético. Por ejemplo, la empresa Municipal de energía de Sacramento (California) (The Sacramento Municipal Utility District SMUD) realizó una evaluación independiente del desempeño mediante pruebas técnicas a los controladores EnviroGrid™, instalados en cinco locales comerciales (una tienda de hardware, dos gimnasios, entre otros), llegando a la conclusión de que el monitoreo continuo demuestra un exitoso control remoto de la demanda de energía (ADM Associates 2012).

Dentro de las diferentes aplicaciones que ha tenido la empresa se encuentran²⁶:

- En el año 2008 la tienda minorista Ingersoll en Ontario-Canadá interesada en reducir la demanda de energía en los aparatos de aire acondicionados usó la tecnología REGEN
- En el año 2009, otra cadena de tiendas minorista, “Big Box” en Estados Unidos, logra reducir su demanda de electricidad sin causar alteraciones en la temperatura o la humedad al interior de las tiendas y sin afectar sus operaciones usando los servicios de REGEN Energy
- También se instaló REGEN Energy, en un negocio familiar de teatros en Nuevo México entre los años 2010 y 2011.
- Otra aplicación surgió en la empresa de ingeniería y fabricación Light industrial en California interesada en el año 2012. REGEN redujo la demanda eléctrica y prescindió de la intervención por parte de los empleados.

Con referencia al análisis de la patente de Kulyk y Kerbel (2009), los conceptos de emergencia, auto-organización, lógica de enjambre son mencionados como parte del desarrollo de esta tecnología, lo cual especifica el principio que toma de la naturaleza, la idea inspiradora de esta tecnología, debido a que de manera análoga al comportamiento de enjambre de las abejas, el algoritmo produce un comportamiento emergente a partir de la información de cada dispositivo individual y genera un comportamiento colectivo, en el sentido que, el sistema completo consigue optimizar el uso de la energía para un sistema eléctrico dado, lo cual indica o apunta hacia el rol de los modelos naturales como inspiración.

7.7. Tecnología marítima inspirada en los insectos: Solar Sailor (El Marinero Solar).

La trayectoria de bioinspiración de Robert Dane, el creador de la tecnología de paneles solares que sirven como vela e impulsan y dan energía a las embarcaciones, inició con la observación de competencias de botes que utilizaban paneles solares para recolectar

²⁶ Véase <http://www.regenenergy.com/case-studies/>

energía. Esta experiencia le generó una inquietud frente al uso de la energía solar en la navegación: por una parte el aprovechamiento de la energía solar proveniente del sol representaba un gran potencial pero por otra parte la manera en que estaban siendo utilizados los paneles era incompatible con el aprovechamiento de la energía proveniente del viento, razón por la cual Dane se preguntaba si existiría la posibilidad de hacer compatibles el uso de la energía solar y la energía eólica de manera simultánea.

El diseño de una vela cubierta por paneles solares que recolecta energía solar a la vez que tiene la capacidad de impulsar la embarcación aprovechando el viento fue la solución.

El momento definitivo de bioinspiración aparece a través de las lecturas de libros científicos sobre la evolución de los insectos, las cuales le permitieron descubrir que la forma y la función de las alas de estas especies, inicialmente estaban orientadas hacia la recolección de energía solar y posteriormente fueron empleadas en actividades de vuelo²⁷:

“El momento que cambió mi vida fue cuando yo estaba leyendo en un avión camino a unas vacaciones...mi libro estaba explicando que el noventa por ciento de las especies en esta tierra son los insectos y, además, que el noventa por ciento de los insectos volaban. Fue fascinante aprender que los insectos evolucionaron inicialmente alas como recolectores solares y sólo las usaron después para volar. Cuando leí esto es cuando realmente pensé, que tal vez los barcos podían usar las alas tanto para recolectar energía solar como para navegar.”

La tecnología del Solar Sailor consiste en un ala rotatoria, capaz de girar en dos ejes y cumplir de manera simultánea las funciones de vela y colector solar. Se trata de una estructura operada hidráulicamente y controlada por ordenador. Uno de los aportes distintivos de la tecnología es su capacidad girar para maximizar la exposición de las células fotovoltaicas al sol, lo que permite un incremento de un 40% en la recolección de energía en comparación con los paneles fotovoltaicos fijos. Esta innovación le permite a la embarcación complementar o alternar el uso de energía solar con el de la energía eólica a través de la vela²⁸.

En términos del ahorro de combustibles fósiles, la eficiencia del Solar Sailor ha sido probada en su aplicación al ferry que cubre la ruta entre la ciudad de San Francisco y la isla de Alcatraz en California; se calcula que el ahorro de diesel asciende a 10.600 litros por año debido al uso de paneles solares a lo cual deben sumarse los 20.000 litros ahorrados por la propulsión alcanzada con la energía eólica. Adicionalmente, la contaminación por efluentes tóxicos disminuye notablemente, razón por la cual las autoridades ambientales

²⁷ Véase <http://www.baycrossings.com/dispnews.php?id=458>

²⁸ Véase http://www.well-tech.it/WTAward/sustainability/SCHEDA/SOLAR%20SAILOR_solarsail.pdf

de la bahía de San Francisco aprobaron el uso de esta tecnología que superó los estándares propuestos superando a otras 38 tecnologías²⁹.

Llama la atención que el desarrollo de esta innovación tiene como punto de partida la idea de un inventor que no cuenta con formación académica en áreas relacionadas con la tecnología naval o la ingeniería; y que contó para el desarrollo el primer prototipo con la contribución de artesanos especializados que fueron materializando las ideas de Dane: Marjorie Kendall (agricultora y entusiasta del uso de la energía solar) primera accionista de la empresa Solar de Sailor Holdings Ltd, Bruce Heggie (fabricante de tablas de surf) materializó los diseños de Dane de alas sólidas para el barco prototipo denominado Marjorie K, Butch Johnston (constructor de barcos y marinero) elaboró el mecanismo móvil para permitir que las alas tengan movimiento en dos dimensiones para seguir al sol y al viento, adaptando la idea de Dane de aprovechar la analogía de este mecanismo con el movimiento de la articulación del hombro humano; y, Grahamen Parker (arquitecto naval) en la comercialización.

Dane fundó en 1999 Solar Sailor Holding Ltd, y posteriormente recibió una subvención de \$1 millón del gobierno australiano para construir un ferry en el puerto de Sydney para los Juegos Olímpicos de 2000. Las aplicaciones comerciales de la tecnología Solar Sailor más destacadas son el ferry, con capacidad entre 400 a 500 pasajeros y está propulsado principalmente por la energía solar, que une la bahía de San Francisco con la isla de Alcatraz y cuatro ferries, con capacidad para 100 pasajeros, que funcionan con energía solar construidos para Hong Kong Jockey Club (HKJC) en China, que entró en operación en el año 2010, y para el cual se estiman los ahorros de combustibles en 474.000 litros por año equivalente a una reducción en el gasto de 2.5 millones de \$HK. Adicionalmente, una reducción 1247 toneladas de CO2 emitido a la atmósfera³⁰.

Desde el punto de vista del tipo de aprendizaje desde el capital natural que representa la innovación tecnológica de Solar Sailor, el hecho de que solo se tomó de la naturaleza el aprovechamiento de la energía solar a partir de la configuración de alas solares como idea inspiradora y que por lo tanto, no se dio el paso hacia un ejercicio de transferencia de tecnología identificado como biomimético; puede ser corroborado con la revisión de la patente, la cual no presenta referencia alguna a los insectos, sus alas, o sus estrategias para captar energía. E incluso hace alusión a otra idea bioinspirada, que no es mencionada en ninguna otra parte por el inventor, con relación a la forma del bote y el aspecto general de un animal acuático:

“La configuración exterior del casco o cuerpo de los vehículos oceánicos no tripulados adecuadamente tiene el aspecto general de un animal acuático, tales

²⁹ Véase http://solarsailor.com/wp-content/uploads/2011/05/131006_NewScientist_SolarSailing.pdf

³⁰ Véase http://corporate.hkjc.com/corporate/corporate-news/english/2010-06/news_2010062525631.aspx

como peces, delfines, ballenas, tortugas, calamares, pulpo u otro animal acuático idóneo”(Dane y Payne 2010: 10).

Por otra parte, las investigaciones recientes acerca de la capacidad que tienen los insectos para transformar la luz solar en energía indican que existen posibilidades de transferir la tecnología natural hacia aplicaciones desarrolladas por los humanos. En el artículo donde se explica cómo funcionan las alas de los insectos a manera de un sistema de celdas solares, Ragaei y Sabry (2013) demostraron que la mayoría de las especies de insectos voladores usan el pigmento en sus alas para absorber la luz y re-emitir esta luz como fluorescencia. Este mecanismo puede ser utilizado como una fuente alternativa de energía en la naturaleza. Entre las especies analizadas se encuentran los siguientes insectos voladores: libélulas, (*Orthetrum brunneum*), mariquita de siete manchas (*Coccinella septempunctata*), gusanos blancos (*bispinosus Pentodon*) y polilla (*sphingid* y *Acherontia styx*). Los autores afirman, basándose en abundante literatura, que existen formas contemporáneas para reproducir o copiar de manera biomimética la capacidad que tienen los insectos, tales como las mariposas, de capturar y aprovechar la energía solar, o incluso la posibilidad de construir paneles solares basados en estrategias biomiméticas. Sin embargo, en el caso de la tecnología empleada por Solar Sailor no se emplea estrictamente este tipo de desarrollo tecnológico, sino que simplemente se basa en la idea de su autor de imitar la capacidad de ciertos insectos de acumular energía solar en sus alas.

7.8. Biomimética Fallida, Bioinspiración Exitosa en los Trajes de baño Speedo Fastskin®.

El Speedo Fastskin® es un traje de baño de cuerpo entero que se inspira en la piel del tiburón en un intento de maximizar la velocidad del nadador. Según lo manifiesta la compañía Speedo el traje de baño está elaborado con una tela que emula los dentículos dérmicos de la piel de los tiburones con el propósito de disminuir la fricción y la turbulencia generada por el cuerpo.

El tiburón fue utilizado como modelo para los trajes de baño Fastskin y Fastskin FSII. La tela Fastskin se construyó tomando como referente a los dentículos que emulan la piel natural de los tiburones, con un tejido elástico que mejorar el ajuste de la tela hacia la piel del nadador y comprime los músculos. El resultado es una reducción de la resistencia y vibración muscular, lo que aumenta la velocidad³¹:

“El secreto detrás de la piel de tiburón son sus dentículos dérmicos, que se asemejan a diminutos hidroplaneadores/alerones con crestas en forma de V... Los dentículos dérmicos disminuyen la fricción y la turbulencia en todo el cuerpo, ya

³¹ Véase la declaración de Speedo <http://www.thefreelibrary.com/SPEEDO+Introduces+Fastskin+--+the+Fastest+Swimsuit+Ever+Made-a060827273>

que dirigen el flujo de agua sobre el cuerpo y permiten que el agua que rodea al tiburón pase con mayor eficacia... La tela es una construcción biomimética que tiene crestas, donde se forman pequeños vórtices. Las crestas son calculadas científicamente para que tengan la altura y la anchura en proporción exacta a la de los denticulos dérmicos del tiburón, que es la configuración más eficiente de la velocidad”

La compañía introdujo el traje Fastskin® para la natación de competición, diseñado para reducir la resistencia y optimizar el rendimiento de los nadadores competitivos y fue usado por la mayoría de los competidores en los Juegos Olímpicos de Sydney 2000. El 80% de las medallas en las competiciones de natación fueron ganadas por los atletas que llevaban los trajes Speedo Fastskin. Los nadadores que usaron el traje también rompieron 13 de 15 récords mundiales.

Para los Juegos Olímpicos de Atenas en el año 2004, fue presentado el Speedo Fastskin FSII, con el cual se obtuvieron más medallas que con otras marcas, y 5 de 8 record mundiales quebrados se atribuyen a nadadores que emplearon el traje. En 2008 con el desarrollo del programa de dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) Speedo lanza a nivel mundial el traje LZR RACER® para los Juegos de Beijing. Gracias a la tecnología de la compañía ANSYS FLUENT, Inc., Speedo utilizó el análisis CFD para guiar, probar y refinar el diseño del traje, que reúne a una serie de investigaciones con el objetivo de mejorar el rendimiento. El resultado, según lo afirma el productor, es un traje de baño que tiene un 10% menor resistencia pasiva que el traje Fastskin FSII y el 38% de arrastre pasivo que otros trajes de baño elaborados en Lycra.

El principio de eficiencia hidrodinámica del tiburón y el proceso de Bioinspiración.

Las declaraciones dadas en entrevistas por la creadora del traje nos acercan a la comprensión de la manera concreta en la que obtuvo inspiración e ideas a través del conocimiento y la observación del desempeño hidrodinámico de los tiburones.

En una entrevista dada a Rachel Hayward y Ben Miller en el año 2009, a propósito de su nominación al premio de mejor inventor europeo, declaró³²:

"Una superficie lisa no es la mejor manera de ir rápido, pero la naturaleza ha encontrado una ingeniosa manera de hacer frente a las turbulencias...a través del proceso de evolución, el tiburón ha desarrollado rugosidades sobre su piel, conocidas como denticulos. Ellos reducen la cantidad de agua que entra en contacto con la piel, disminuyendo así la fuerza de arrastre sobre el tiburón"

³² Véase <http://www.culture24.org.uk/teachers/ideas%20and%20resources/art68090>

Como líder del equipo de investigación y desarrollo de Speedo, Fiona Fairhurst se asesoró con el curador de peces del departamento de vertebrados del museo de historia natural de Londres, Oliver Crummin, quien le explicó que los tiburones podrían ser su referente o modelo natural³³:

“Speedo quería averiguar cómo es que los tiburones nadan tan rápidamente y luego utilizar esta ciencia para ayudar a que los nadadores humanos mejoren su desempeño. Los investigadores descubrieron que la superficie de la piel del tiburón está cubierta de dentículos dérmicos o pequeños 'dientes'. La forma y el posicionamiento de estos dentículos varía a través del cuerpo del tiburón, permitiéndole un manejo del flujo de agua en la forma más eficiente...Los dentículos también trabajan en el área entre la piel y el agua, reduciendo la resistencia y permitiendo que el tiburón se deslice a través del mar”.

En el año de 1999, Fairhurst lideró el equipo de investigación y desarrolló nuevos productos de Speedo, teniendo la iniciativa de observar y proponerle a su equipo el reto de copiar la piel de tiburón para conseguir el mejor desempeño para los nadadores que usaran el traje Fastskin.

Investigación y Desarrollo Aplicada a los Trajes de Baño.

El desarrollo del Producto puede observarse a través de las patentes asociadas al mismo. La inventora del traje speedo Fastskin, Fiona Fairhurst, en compañía de otros integrantes del equipo de investigación y desarrollo de la compañía Speedo, han conseguido el otorgamiento de varias patentes relacionadas con estos trajes de baño deportivos. A manera de ilustración pueden mencionarse dos de ellas; la patente No. D456111 S1 de Fairhurst et al. (2002), en la que registran básicamente los diseños ornamentales de los trajes, y en la patente de Fairhurst y Cappaert (2008) en la cual se presenta el diseño para la confección del traje en el cual son importantes los cortes o secciones del mismo, las costuras y el ajuste a la piel a los cuales se les atribuye la disminución en la fuerza de arrastre y la mejoría en la hidrodinámica.

La compañía conformó un equipo complementario al de su unidad de investigación y desarrollo, con consultores externos expertos en dinámica de fluidos computacional (CDF, por sus siglas en inglés) conformado por Barry Bixler (ingeniero experto en CDF), Stephen Wilkinson (Ingeniero aeroespacial de la NASA), y las pruebas realizadas por el equipo determinaron que fuera cambiado o sustituido el diseño con dentículos, característico del modelo fastskin, para dar paso al traje LZR³⁴:

³³ Véase <http://www.nhm.ac.uk/about-us/news/2008/august/olympic-swimsuit-mimics-shark-skin18219.html>

³⁴ Véase <http://www.rsefas.org/noticias/en-ingles/sobre-como-la-fisica-ayuda-a-batir-records/>

“Wilkinson mide el coeficiente de fricción de la piel de más de 60 telas en un túnel de viento de baja velocidad con una sección transversal de 18 × 28 cm en el Centro de Investigación de la física de fluidos. Los resultados llevaron a Speedo a utilizar un tejido de nylon elastano ligero como tela de base para el LZR Racer”

Adicionalmente, el equipo técnico conformado por Speedo ha publicado los resultados de test realizados a nadadores empleando la CFD, para crear modelos que permitan comprender mejor los patrones de eficiencia de los nadadores humanos (Bixler, Pease y Fairhurst 2007).

La influencia del diseño de trajes de baño competitivos basado en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional ha sido reconocida por analistas independientes como un avance en el estudio de la biomecánica de la natación humana, relacionado tanto con el estudio de la natación animal, como con la investigación científica de la natación deportiva, campo en el cual la alianza entre las compañías Speedo (trajes e implementos de natación) y Fluent CFD Software ha conseguido mejorar el desempeño hidrodinámico, en los trajes Speedo ftskin II y LZR.

El diseño de los trajes de baño Fastskin I y Fastkin SFII: Una historia de biomimética fallida.

La historia de los intentos de transferir -en términos estrictamente biomiméticos- la capacidad que tiene la piel de los tiburones para reducir la fuerza de arrastre en un medio de fluidos en turbulencia se ha basado en los dentículos característicos de la piel del tiburón y se remonta –cuando menos- a mediados de los años ochenta con el uso de películas de vinilo aplicadas a los cascos de embarcaciones de competición, aeroplanos Boeing y Airbus y tuberías, pero el único caso en el que se reclama una aplicación comercializada en el mercado es el de los trajes de baño de speedo:

"El mercado comercial dominante y tal vez el único en el que la tecnología de protuberancias para reducir la fricción es comercializada es el de los trajes de baño competitivos...La población en general se dio cuenta de los beneficios de la reducción de la fuerza de arrastre relacionada con la piel del tiburón, con la introducción de los trajes Fastskin por Speedo en 2004. Speedo reclamó una reducción de la resistencia de varios puntos porcentuales en una prueba estática en comparación con otros trajes de carreras. Sin embargo, dados los compromisos hechos frente a la geometría de los dentículos durante la fabricación, es difícil creer en el alcance total de la reducción de la resistencia reclamada por speedo" (Bushan y Dean 2010:4795).

Los autores muestran en esta revisión del estado del arte de las aplicaciones o intentos de transferencia biomimética, que la geometría de los dentículos es la clave para la optimización de las fuerzas hidrodinámicas, y su análisis microscópico del espesor y la

escala de los dentículos en el tejido creado por Speedo les lleva a concluir que no se consigue transferir realmente la función que cumplen los dentículos en la piel del tiburón.

De manera complementaria, puede citarse la prueba independiente realizada por los investigadores del museo de zoología comparada de la Universidad de Harvard Oeffner y Lauder (2012), quienes fueron los primeros en aplicar un test científico independiente para evaluar las afirmaciones de la compañía Speedo sobre la aplicación de la biomimética en su diseño y la capacidad del traje para incrementar las velocidades de natación. El test cuantitativo se basó en la experimentación comparativa controlada, en laboratorio, de los materiales sintéticos frente a la piel de tiburón, mediante el empleo de robots que permitieron evaluar el desempeño natatorio bajo condiciones dinámicas.

La confrontación entre la piel natural del tiburón y la tela desarrollada por Speedo con dentículos mostró un incremento de la velocidad de natación de la piel natural del 12.3% frente a un 7.2% alcanzado por la piel artificial de Speedo. Las conclusiones del test indican, además, que además de la forma dentada, la deformación de la membrana de la piel del tiburón, su flexibilidad dinámica mientras realiza los movimientos al nadar, es un factor determinante en la reducción de la fuerza de arrastre y el incremento de la fuerza de empuje hacia delante.

Los investigadores concluyeron que, si bien es cierto que los dentículos y sus deformaciones son claves en la mayor eficiencia alcanzada por los tiburones en su medio natural, la mayor eficiencia atribuida o alcanzada por los trajes Fastskin II no puede atribuirse a su pretendida estructura biomimética, a la forma de los dentículos incorporada en ellos³⁵:

"La superficie de los trajes de baño como el Speedo Fastskin II no tiene efecto cuando se trata de reducir la fricción cuando los nadadores se mueven a través del agua...de hecho, no es para nada como la piel de tiburón...lo que hemos demostrado de forma concluyente es que las propiedades de la superficie en sí, que el fabricante afirmaba eran biomiméticas, no hacen nada en favor de la propulsión".

Los investigadores de Harvard señalan que el buen desempeño de los nadadores que usan los trajes de baño Fastskin debe ser atribuible a otros factores diferentes de los dentículos.

En síntesis, los trajes de baño Fastskin de Speedo ilustran de manera sobresaliente la forma en la que muchas compañías están utilizando las referencias a la biomimética, a la

³⁵ Véase <http://news.harvard.edu/gazette/story/2012/02/a-swimsuit-like-shark-skin-not-so-fast/>

transferencia efectiva de principios naturales, como un efectivo reclamo publicitario, pero cuyos productos representan, a lo sumo, ejercicios de bioinspiración.

Para algunos analistas de mercado, la estrategia de Speedo fue exitosa, a tal punto que le permitió alcanzar, para el año 2008 unas ventas mundiales de 555 millones de dólares y una participación de mercado del 60% (Purkayastha y Maseeha 2009).

7.9. El escarabajo como precursor de la Sierra de cadena para cortar madera.

La técnica de perforación de madera exhibida por la larva de un escarabajo *ergates spiculatus*, fue la inspiración de Joseph Buford Cox, el inventor de la moderna sierra de cadena de cortar madera, en la década de 1940. Cox que trabajaba como maderero, en el año de 1946 observó la actividad de estos insectos del tamaño de un pulgar, que mastican sin parar la madera del árbol donde se encuentran, a veces a lo largo de las vetas de madera y a veces en contra de ellas. Una inspección más de cerca, reveló que la pequeña cabeza tenía un par de mandíbulas afiladas que se mueven lateralmente apretando y cortando los trozos de madera:

“Él (Joe Cox) observó que la cabeza de la larva tenía dos robustas mandíbulas afiladas. Sujetando una lupa, Cox pasó muchas horas estudiando la acción perforadora del *Ergates spiculatus*... Él estaba muy intrigado por la acción de corte de la larva de izquierda a derecha, lado a lado, en lugar de escarbar o excavar hacia el frente. Era una técnica increíble que comenzó a obsesionar a Joe Cox. Algo empezó a germinar en su mente”. Lucia (1975, 164).

Durante el siguiente año, Cox diseñó y construyó la “sierra de cortar” (Chipper Chain) con una cadena de dientes curvados para cortar emulando el diseño de los dientes cortantes en las mandíbulas de las larvas del escarabajo perforadoras de madera:

“más específicamente el propósito primario de la presente invención es (el de) proveer una cadena para la sierra en la cual toda la acción de corte es desempeñada por elementos cortantes idénticos entre ellos, excepto que los elementos sucesivos están alternando su configuración a derecha e izquierda, los respectivos elementos cortantes están provisto sobre eslabones individuales de la cadena para facilitar la manufactura, mantenimiento y un desempeño mejorado” (Cox 1946, 4).

Joe Cox fundó, en ese mismo año 1947, la empresa Oregon Saw Chain Corporation. Para el año 1951, la empresa se denominada simplemente Oregon® y sus ventas superaban los US \$ 1 millón. Al año siguiente, adquirieron la empresa Planer Chain Ltd de Ontario, Canadá. En 1953, Cox vendió la compañía a John Gray y continuó creciendo. En 1959, la

empresa se trasladó a los mercados internacionales e hizo su primera solicitud de patente para la cadena de sierra. En 1963, se fabricó una nueva sierra con una nueva cadena que inició la era moderna de alta velocidad, sierras de cadena ligera de accionamiento directo derivada del diseño original, el cual sigue siendo ampliamente utilizado hoy en día y representa uno de los avances más influyentes en la historia de la explotación de la madera³⁶.

La idea del inventor se inspira en la naturaleza y posteriormente copia el diseño de la mandíbula de la larva del escarabajo, la cual se lleva a cabo de manera más eficiente el corte de madera dado que se realizan movimientos alternados hacia los lados (a derecha e izquierda y viceversa) en vez un corte en línea recta y hacia el frente. Este ejercicio de bioinspiración surge de una observación atenta de la forma como una especie natural (la larva del escarabajo) realiza parte de su ciclo vital alojándose en la corteza de los árboles. Es decir que, la sierra de cortar madera no fue el resultado de un análisis científico y el inventor no era un experto de la naturaleza (no era un científico, ni ingeniero), si no que surgió de la observación minuciosa de un “aserrador” (logger).

En la naturaleza, las larvas del escarabajo *Ergates Spiculatus* se alimentan de madera y con este propósito perforan troncos y maderos, mediante un aparato masticador bien desarrollado:

“Las larvas de este animal están entre los pocos insectos (otros son las termitas) que digieren la madera, es decir, descomponen el polímero de la celulosa y lo transforman en azúcar simple aprovechable metabólicamente. Pero empiezan masticando la madera con pares de mandíbulas que, a la manera de los insectos, mueven lateralmente y no, como las mandíbulas de los vertebrados, arriba y abajo. No hay que sorprenderse, pues, de que estos perforadores de madera (la subfamilia de la Prioninae, de la familia de las Cerambycidae) tenga mandíbulas robustas. Las extienden fuera de la cabeza de tal manera que sus agudos bordes frontales cortan las paredes del túnel que van perforando...” (Vogel 2000: 297).

La sierra de cortar madera es una notable historia de bioinspiración que incluso para algunos autores han señalado que la idea va más allá de la mera inspiración. Vogel (2000, 298) plantea que la sierra de cortar madera es uno de los casos en donde la copia de la tecnología natural ha sido exitosa, como señala el autor, el diseño de Cox representa una cadena de hojas cortantes que replica la forma y posición que tiene la mandíbula de las larvas del escarabajo, de tal forma que no se movían de un lado a otro, sino que apuntaban alternativamente a izquierda y a derecha, lo cual podría considerarse como una tecnología biomimética.

³⁶ Véase <http://www.oregonproducts.com/homeowner/company/history.htm>

Hoy en día, la motosierra es fabricada y comercializada por la empresa Blount Inc, que adquirió a Oregon® desde 1985, la mayoría de motosierras que se venden actualmente tienen el diseño de cadena de Oregon basado en la invención de Joseph Buford Cox. Algunos datos sobre las ventas se presentan en la tabla 10.

Tabla 10. Ventas anuales en miles de dólares de Sierra de cortar madera

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Ventas	243	283	335,26	356,86	359,67	381,83	455,48	385,88

Fuente: Reporte de ventas de la compañía Blount Inc. (2004, 2006, 2009)

7.10. Bioinspiración basada en la Aerodinámica de Semillas Autogiroscópicas.

La dispersión de semillas es la estrategia aplicada por las plantas para esparcir o transportar su herencia genética, de manera robusta, adaptable, eficiente e inteligente tanto desde el punto de vista del comportamiento como desde el punto de vista de la forma; empleando tres métodos de vuelo: autorrotación, paracaidismo y planeo (Pandolfi e Izzo, 2013). Los estudios científicos acerca de la dinámica de fluidos y las propiedades aerodinámicas de las semillas voladoras autogiroscópicas comienzan con las observaciones de Sir George Cayley, el pionero de la aviación, acerca de las sámaras (semillas del árbol Sicomoro, comúnmente llamado Maple), cuyo comportamiento y movimientos aerodinámicos han sido asociados tradicionalmente al vuelo del helicóptero:

“El comportamiento de semillas y frutos autogiroscópicos es extraordinariamente similar a la de un helicóptero y resulta de la combinación de ángulo de ataque y deslizamiento lateral generado por la cuchilla ligeramente curvada del ala de la fruta o semilla. Las velocidades locales desarrolladas en la punta del ala son relativamente altas...producen una gran estabilidad dinámica” (Nikklas 1992: 463).

Resulta entonces lógico, pues, desde el punto de vista de la tecnología humana, que se planteen posibilidades de imitar el vuelo de este tipo de semillas. De esta manera, se busca que la fuerza de sustentación mediante vórtices (LEV) de una tecnología natural convergente sea inspiración de los desarrollos tecnológicos humanos.

Desde el punto de vista de la aerodinámica, la semilla autorrotante del árbol de Arce Canadiense (llamado Maple) comparte un principio natural de vuelo que es universal, en el sentido de que es común a diversas especies vegetales (semillas de maple), de insectos (mosca) y mamíferos (murciélagos).

El principio de fuerza de sustentación que ofrecen los vórtices (masa de aire que giran sobre si mismas) generados en el borde de las alas (LEV, por su sigla en inglés, proveniente de “Leading Edge Vortex”).

Un estudio realizado por un equipo de científicos liderado por el zoólogo David Lentink de la Universidad de Wageningen en Holanda demuestra que el principio LEV explica el elevado desempeño aerodinámico de estas semillas, y sugiere que estamos en presencia de una solución tecnológica de carácter aerodinámico convergente:

“Nuestros resultados indican que estas semillas alcanzan gran altura generando un vórtice de borde de ataque (LEV) a medida que descienden. El LEV compacto, el cual verificamos en muestras reales, permite que las semillas de arce permanezcan en el aire más eficazmente que otra variedad de semillas no auto-rotativas. LEVs también explican la alta elevación generada por el revoloteo de insectos, murciélagos, y posiblemente las aves, lo que sugiere que el uso de LEVs representa una solución aerodinámica convergente en la evolución del rendimiento de vuelo en los animales y las plantas” (Lentink et al. 2009).

A manera de ejemplo puede citarse un estudio aplicado a la aerodinámica del aleteo del murciélago indican que Al menos el 40% de la fuerza de sustentación es debida a la presencia de vórtices generados por el borde del ala durante el aleteo (Muijres et. al, 2008). En el caso de las moscas, los análisis muestran que el alto grado de control de vuelo que poseen está asociado a la interacción de los vórtices generadas en cada ala (Lehmann, 2008).

La Sámara de Maple: inspiradora para el desarrollo de tecnologías de vuelo.

En el contexto de las tecnologías que buscan el aprendizaje de técnicas de vuelo susceptibles de ser transferidas desde la naturaleza, resalta el diseño y construcción de micro vehículos aéreos bioinspirados, de los cuales Roccia *et. al* (2013) reportan al menos seis prototipos que se basan en el mecanismo de autorrotación, para los cuales la sámara es el referente natural:

“Las semillas que ejecutan un movimiento de autorrotación son llamadas sámaras y son, quizás, los “aviadores” más simples, estables y eficientes que la naturaleza ha creado. Más aún, el vuelo exhibido por las sámaras es un ejemplo de elegancia y balance; donde se transforma energía potencial gravitatoria en energía cinética rotacional perpetuando un descenso helicoidal aerodinámicamente estable. En la última década se han propuesto varios diseños innovadores de MAVs que utilizan el mecanismo de autorrotación; algunos de ellos han mostrado un vuelo eficiente;

mientras que otros permanecen aún como diseños conceptuales.” (Roccia et. al, 2013:1482).

Los modelos de vehículos aéreos basados en el concepto de una sola ala rotativa incluyen al vehículo MAVPro de la compañía Lockheed Martin Advanced Technology Laboratories; el Samarai Nano Air Vehicle de la misma compañía; los vehículos Samara I y Samara II desarrollados por la Universidad de Maryland, entre otros.

Cuando se trata de desarrollos de mercado, las aplicaciones derivadas del aprendizaje desde el capital natural, han conseguido inspiración en el vuelo autorrotatorio característico de las semillas del árbol de sicomoro.

Forma y función aerodinámica inspiradora en el desarrollo de bienes de consumo: el ventilador Sycamore.

El ventilador de techo “Sycamore Ceiling Fan” es un producto de consumo para los hogares, desarrollado por la compañía Australiana Sycamore Technology, basado en el concepto de hoja única dinámicamente balanceada, la cual tiene como diferencias frente a los diseños convencionales de ventiladores:

- Su forma dinámica que constituye una réplica de la semilla del Sicomoro (forma y estética).
- La capacidad de operar a bajas velocidades de entre 80 y 160 revoluciones por minuto frente a las velocidades de entre 80 y 220 revoluciones por minuto de los diseños convencionales (bajo consumo de energía).
- La operación de ventilación genera menor turbulencia y menor ruido (eficiencia)

Un equipo de diseñadores industriales diseñó conceptualmente este ventilador inspirado en la semilla del Sicomoro; Los registros de la agencia para la administración de la propiedad intelectual de Australia (IP Australia), muestran que el ventilador de una hoja fue diseñado por Daniel Gasser, Michael Hort, Benjamin Shepherd y Quisinh Tran -al respecto, ver Gasser et al. (1998)- y se registró por primera vez en el mes de Abril de 1998.

Después de contar con este primer prototipo, la producción del ventilador se inició en el año 2001, a partir de pruebas aerodinámicas y modelación en tercera dimensión³⁷:

“En 2001, empezamos a desarrollar el diseño para la producción. La hoja prototipo original se refinó a través de una serie de iteraciones, cada una probada para la liberación de flujo de aire usando un anemómetro de alambre caliente. Nos tomó más de un año, pero finalmente logró nuestro objetivo de hacer una hoja hermosa,

³⁷ Véase <http://www.sycamorefan.com/company/company.html>

tranquila, eficiente, que coincide con el flujo de aire de los ventiladores convencionales, mientras se opera a una velocidad más baja. El diseño final fue modelado usando la hoja de CAD 3D para la fabricación, para garantizar un producto de máxima calidad”.

Finalmente, la compañía Sycamore Technology inició operaciones en el año de 2002, y en el 2005 le fue otorgado el “Good Design Award”, el más prestigioso premio otorgado al diseño de Arquitectura e interiores en Australia³⁸.

Desde el punto de vista técnico, el objetivo del equipo de diseñadores consistía en obtener una combinación de belleza estética, balance estático y balance dinámico a diferentes velocidades de rotación, por lo que adoptaron la forma orgánica de la sámara voladora, tal y como queda consignado en la patente concedida a Michael J. Hort, Daniel Gasser y John M. Levey en 2012:

“La hoja es una forma escultural irregular. Específicamente, la hoja tiene la forma de o es una adaptación de la forma de la vaina de la semilla de sicomoro. Las cuchillas en los dibujos son adaptadas a partir de la forma de la vaina de la semilla sicomoro... la hoja tiene una sección transversal de perfil aerodinámico, con grosor vertical variante desde el borde de ataque hasta el borde de salida. La parte del perfil aerodinámico de la cuchilla está diseñado para crear menos turbulencia y arrastre a su paso. Se puede requerir menos energía para hacerlo girar sobre su eje vertical en comparación con una hoja plana convencional y también puede crear menos ruido del viento. El diseño aerodinámico también puede crear mayor flujo de aire a velocidades más bajas, en comparación con los ventiladores de techo convencionales” (Hort et al. 2012:10).

La hoja de ventilación está diseñada de forma tal que la parte central del ventilador, imitando a la vaina de la semilla de sicomoro, ejerza una fuerza de contrapeso, con lo cual, se consigue un movimiento que emula al de la sámara cuando rota sobre su propio eje al caer del árbol de sicomoro.

Analistas independientes han valorado este producto como representativo del diseño ecológico (Roth y Uphaus 2008), de los productos bioinspirados que constituyen la aplicación de ideas provenientes de la capacidad de optimizar los flujos de aire en aparatos mecánicos³⁹ y como una alternativa innovadora en el campo de los aires acondicionados (Dahl 2013). El ventilador Sycamore Ceiling Fan está disponible en el mercado por un precio que está en el rango de entre 504 y 616 dólares australianos⁴⁰.

³⁸ Véase www.gooddesignaustralia.com

³⁹ Véase http://www.asknature.org/article/view/why_asknature

⁴⁰ Véase <http://www.getprice.com.au/>

CAPÍTULO VIII

El Aprendizaje Del Capital Natural A Partir De La Biomimética

8. El Aprendizaje Del Capital Natural A Partir De La Biomimética

La biomimética puede ser entendida como una forma específica de aprendizaje desde el capital natural a partir de la cual se consigue la transferencia efectiva de conocimiento presente en la naturaleza.

A diferencia de la bioinspiración (el aprovechamiento del referente natural como analogía creativa) o la bioutilización (incorporación funcional de una tecnología natural), la biomimética está orientada a la aplicación de una especie de “ingeniería inversa” que parte del conocimiento detallado del referente o los referentes naturales (Hanks y Swiegers 2012) y consigue replicar la forma, la función, la estructura, los materiales, mecanismos y/o procesos naturales, configurando –entonces- un proceso de aprendizaje desde la naturaleza (Rawlings et al. 2012).

Los desarrollos contemporáneos de la biomimética han alcanzado grados importantes de sofisticación y están fundamentados en los avances de las ciencias básicas, de naturaleza interdisciplinaria:

“El campo de la biomimética es altamente interdisciplinario. Consiste en la comprensión de las funciones estructuras y principios biológicos de diversos objetos encontrados en la naturaleza por los biólogos, físicos, químicos y científicos de materiales, y el diseño y la fabricación de diversos materiales y dispositivos de interés comercial por parte de ingenieros, científicos de materiales, químicos y otros”(Bushan, 2009: 1446).

A partir del análisis detallado de diez tecnologías biomiméticas, que representan innovaciones en campos tan diversos como la construcción, la arquitectura y el diseño, el transporte, de la refrigeración, o la preservación de muestras biológicas, medicamentos y vacunas, entre otros, se explora esta segunda modalidad de aprendizaje desde el capital natural.

8.1. Sistemas biomiméticos de refrigeración: el caso del Eastgate Centre building

El Eastgate Centre es un edificio ubicado en Harare (Zimbabwe), usado como centro comercial desde el año de 1996. Fue diseñado por el arquitecto Mick Pearce y desarrollado con un equipo de ingenieros de la empresa Arup Associates.

El Eastgate Centre no es un edificio convencional, está diseñado para que la temperatura al interior de la construcción se mantenga estable mientras que la temperatura en el exterior fluctúa entre 10° y 42°C, es decir, el edificio tiene un sistema de refrigeración pasiva que consiste básicamente en almacenar calor de día y ventilar por la noche cuando

la temperatura baja. Desde el punto de vista del diseño arquitectónico, el desempeño alcanzado por el Eastgate Centre, en términos de control térmico, se consigue a través de un diseño adecuado de los sistemas de flujo de aire y de superficie que permiten la transferencia y almacenamiento del calor (Baird 2001: 169).

La idea de generar un sistema de refrigeración pasiva en la estructura del edificio Eastgate se inspiró en los montículos de las termitas africanas (*Macrotermes michaelsoni*) que autorregulan su temperatura al interior. El arquitecto Pearce remonta su trayectoria de diseñador inspirado en la naturaleza a la influencia que ejerció en su pensamiento y en su obra el libro "Arquitectura sin arquitectos" de Bernard Rudofsky en los años sesenta, el cual lo llevó a plantearse la idea de que la arquitectura bioclimática eficiente debería derivarse de principios orgánicos más que de principios mecanicistas (Tzonis et al. 2001: 48). Puntualmente, la idea de construir un edificio autorregulado surgió en la década de los noventa, cuando el arquitecto Mick Pearce veía un documental mientras enfrentaba el desafío de construir un edificio que fuera energéticamente eficiente para vivir en un clima sub-tropical:

"Yo estaba viendo un documental de David Attenborough en la década de los 90 tomando un respiro de mi problema de diseño actual: ¿Cómo se diseña un edificio energéticamente eficiente en un clima sub-tropical, que también sea cómodo para vivir?... Attenborough estaba explicando cómo las termitas Nigerianas sobreviven en temperaturas extremas. Construyen sus casas - termiteros - para mantener la humedad y el calor" (Pearce 2013).

Tras este proceso de bioinspiración, se inicia una etapa de retroalimentación entre los diseños arquitectónicos de Pearce y los desarrollos técnicos proporcionados por los ingenieros mecánicos de la empresa Ove Arup Association de Londres, que durante 3 años, hicieron viable el diseño mediante modelos computacionales que simulaban las condiciones de circulación del aire y temperatura optimizando la sincronización de los ventiladores durante el día y la noche (Tzonis et al. 2001: 49).

Esta tecnología exitosa de refrigeración que aprovecha los principios transferidos desde la naturaleza ha sido replicada: en el año 2001 se inauguró el Portcullis House un edificio de oficinas para miembros del parlamento y personal en Westminster Londres (Reino Unido), basado en el sistema utilizado en el edificio Eastgate, por medio de chimeneas como parte de un sistema de aire acondicionado sin alimentación para extraer el aire a través del edificio, aprovechando los flujos naturales.

El Eastgate Centre ha sido identificado como una muestra plena de aplicación biomimética por parte de diversos expertos. En los anales de la reunión número cuarenta de la Asociación Internacional para la Investigación del diseño Medio ambiental "Environmental Design Research Association EDRA" se señala:

“...una revisión más profunda revela que la forma del Eastgate surge de las necesidades de la vida diaria y está basada en el uso. La forma del edificio sirve para copiar los procesos naturales, no simplemente la estructura” (Environmental Design Research Association EDRA 2009: 43.)

De otra parte, algunos analistas contemporáneos señalan que el edificio no reproduce el funcionamiento natural de los termiteros y por lo tanto no constituye un ejercicio propiamente biomimético; puesto que hasta el momento en el que se construyó el edificio se aplicaron los principios que se atribuían al funcionamiento de los termiteros pero los estudios más recientes acerca de su funcionamiento indican que el proceso de refrigeración del Eastgate Centre no constituye una reproducción del mecanismo de enfriamiento natural de los montículos. Tal es el planteamiento de un equipo de científicos Turner y Soar:

“Durante los últimos años, hemos estado estudiando la estructura y función de la termiteros que inspiraron a Mick Pearce. En el proceso, hemos aprendido muchas cosas, entre ellos algo muy notable: el Centro comercial Eastgate se inspira en una errónea concepción de cómo funcionan realmente los montículos de termitas. Esto no pretende ser una crítica, por supuesto: Pearce sólo estaba siguiendo las ideas dominantes de la época, y el resultado final: Es un edificio de éxito de todos modos” (Turner y Soar 2008: 1).

De ser cierto el argumento de estos autores, en el caso de la tecnología derivada de las termitas se presenta la paradoja de que un ejercicio biomimético exitoso puede pasar a ser considerado solo como un caso de bioinspiración debido a la obsolescencia del conocimiento científico que lo sustenta. Aun así las virtudes del diseño siguen siendo admirables, tal como lo admiten Turner y Soar (2008: 2) al manifestar que: “lo que hace al Eastgate más resaltable es el hecho de que combina muchas características del diseño de los montículos de termitas, los cuales tiene gran diversidad estructural”.

Los modelos explicativos del funcionamiento del montículo de las termitas son dos: de una parte el modelo denominado “efecto termosifón” (Thermosiphon Mechanism) y de otra parte, el modelo denominado de “flujo inducido” conocido por parte de los arquitectos e ingenieros como “efecto chimenea” (Stack effect).

Puesto que existen dos interpretaciones del funcionamiento de los montículos de las termitas; una convencional asociada a los efectos de ventilación tipo chimenea y otra contemporánea, que emplea como analogía un sistema pulmonar; la evaluación que se haga del carácter biomimético del Eastgate depende de cuál de estas dos interpretaciones se emplea para juzgarlo.

Siguiendo el análisis de Turner y Soar, el Eastgate Centre logra combinar esos dos modelos (Chimenea y Pulmonar), logrando de manera eficiente mantener una temperatura interior estable sin requerir una planta de aire acondicionado suplementaria. En ese sentido, el edificio Eastgate hasta el momento de su construcción efectivamente representa un ejercicio biomimético. Sin embargo, es necesario reconsiderar esta clasificación a la luz de los avances más recientes en la comprensión científica del funcionamiento de los montículos de termitas que los considera como sistemas de ventilación pulmonar lo cual implica que la interpretación del rol funcional desempeñado por la chimenea en el termitero haya cambiado radicalmente al descubrirse que el aire capturado por la chimenea no cumple una función de regulación de la temperatura del nido o componente subterráneo.

De ser cierta esta interpretación, el diseño del Eastgate Centre se basaba en la idea errónea de que la chimenea cumplía una función de captura de aire para el enfriamiento de la base inferior del termitero (subterráneo). Es decir, el sistema exitoso de enfriamiento que aprovecha tubos en la altura y la superficie para enfriar las secciones inferiores del edificio no replica el diseño natural de enfriamiento empleado por las termitas; o lo que es lo mismo, el sistema de refrigeración pasiva como tecnología humana creada para el Eastgate Centre y los edificios que lo emulan, no estarían emulando el verdadero mecanismo usado por los termiteros, el cual obedece al modelo de sistema pulmonar.

En este caso queda en evidencia la manera en la que el avance en el conocimiento científico básico puede modificar la evaluación del carácter biomimético conferido a una tecnología. Quienes consideraron a la tecnología humana de ventilación basada en el principio de la chimenea como un caso representativo de la biomimética estaban en lo correcto desde el punto de vista de los conocimientos disponibles en su tiempo. Pero igualmente quienes señalan que dado el conocimiento contemporáneo que la ciencia tiene de los termiteros, no debe considerarse la tecnología humana de enfriamiento como biomimética, tienen razón. Este es un ejemplo de cuán difícil es la clasificación de estas tecnologías, debido a que la frontera del conocimiento científico está permanentemente avanzando y genera modificación en los parámetros que permiten evaluar o interpretar las características de una tecnología dada.

8.2. El efecto loto: aprendizaje biomimético de la nanotecnología

El portal Europeo de información sobre nano - ciencias y nano – tecnologías en su reporte sobre los productos de consumo que incorporan la nano – tecnología como la explotación de la capacidad de controlar la materia en dimensiones de entre 0.1 y 100 nanómetros, e identifica al efecto loto como la base para el desarrollo de productos con superficies auto – limpiantes y superficies foto – catalíticas; siendo la pintura Lotusan representativa del primer tipo de productos, y las tejas Erlus del segundo (Gleiche *et. al* 2006).

Estos dos productos, basados en el aprendizaje biomimético desde el capital natural, han conseguido de manera exitosa la transferencia de propiedades encontradas en la planta llamada “Loto Sagrado”. El efecto loto, derivado de las investigaciones realizadas sobre la planta *Nelumbo Nucifera*, destaca como una de las fuentes de bioinspiración y de aplicación biomimética más interesantes para el desarrollo de tecnologías humanas. La planta *Nelumbo Nucifera* (loto sagrado), es una planta acuática que se encuentra principalmente en países del este asiático. Muchos investigadores (Barthlott y Ehler 1977, Barthlott y Wollenweber 1981, Barthlott 1990, Kerstiens 1996, Barthlott y Neinhuis 1997, Von Baeyer 2000, entre otros) han estudiado las hojas del loto sagrado por su capacidad de mantenerse limpias, a pesar de que su hábitat es fangoso.

El “Lotus Effekt” como fuente de aprendizaje desde el capital natural.

La búsqueda de tecnologías que permitan contar con superficies capaces de repeler el agua se remontan, cuando menos, a la década de los años sesenta, por ejemplo, en el año de 1967 se concedió la patente No. 3354022 a Robert H. Dettre, Harold L. Jackson, y Rulon Edward Johnson por crear una superficie repelente al agua (Dettre et al. 1967). Sin embargo la utilización de referentes naturales como fuente de inspiración y de transferencia tecnológica hacia el ámbito humano se remonta a 1972, cuando se inician los estudios científicos de las superficies de las plantas mediante un microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscopy, siglas en inglés SEM), con el cual fue posible explorar y visualizar la escala micro y nano - métrica de la estructura en la superficie de las plantas.

Los botánicos alemanes Barthlott y Ehler, en 1977, realizan la primera publicación sobre la propiedad de auto-limpieza de las estructuras micro y las nano - estructuras hidrofóbicas de la planta espermatofita. A finales de los años ochenta, el Ministerio Federal de Investigación y Tecnología Alemán realiza el primer proyecto para estudiar la capacidad de auto-limpieza del Loto sagrado y la posibilidad de encontrar una técnica de aplicación biomimética. En 1994, Barthlott obtiene patente para el proceso de producción de superficies autolimpiantes (Barthlott 2003) en Europa, Estados Unidos y otros países. En el mismo año, inventa y registra la marca Lotus-Effekt® (efecto loto).

Las perspectivas de aplicación y desarrollo tecnológico aplicado empiezan cuando las compañías Sto corp, Erlus, Evonik y Ferro, en 1995, muestran interés en el Lotus Effekt® y se inicia la cooperación entre los equipos de botánicos y estas empresas en las investigaciones posteriores sobre la planta. Barthlott junto con el también botánico C. Neinhuis, en la Universidad de Bonn en Alemania, publican en 1997 el artículo “Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces” en la revista *Planta*. En este artículo, los autores demuestran por primera vez que la interdependencia entre la rugosidad de la superficie, la reducción de la adherencia de partículas y la repelencia al agua son los factores clave en el mecanismo de auto-limpieza que poseen muchas

superficies biológicas. En 1999, Barthlott y Neinhuis patentan un método para producir superficies auto - limpiantes (Barthlott y Neinhuis 2000), el cual se refiere a un material hidrofóbico –una cera- que al aplicarse crea una superficie con protuberancias a micro - escala que tienen la propiedad de ser auto - limpiantes; el material revestido puede ser removido con detergentes. En este mismo año, la empresa Sto Corp, produce Lotusan® una pintura exterior auto - limpiante.

a. Propiedades Biológicas de la Hoja de Loto.

Los trabajos científicos han permitido la caracterización de tres propiedades de la hoja de loto (una completa y detallada descripción puede encontrarse en Nosonovsky y Bormashenko (2009), que es hidrofóbica (la superficie repele el agua o evita mezclarse con ella), anti – adherente (la capacidad de evitar que el polvo u otras sustancias puedan fijarse sobre la superficie) y auto -limpiante (no requiere de agentes externos para permanecer libre de suciedad o desechos). Las dos primeras propiedades se deben a la interacción entre la estructura a escala micro y la escala nano de la superficie. A escala micro, la hoja de loto tiene papilas que están distribuidas de manera aleatoria a una distancia entre 5 y 9 micrómetros de diámetro; y a escala nano, tiene unas estructuras ramificadas que poseen un diámetro de alrededor de 120 nanómetros. Debido a estas protuberancias -a escala micro y nano- que sobresalen de la superficie de las hojas, las gotas de agua no alcanzan la superficie; haciendo que el agua puede rodar libremente en todas las direcciones, reduciendo la fuerza adhesiva de la superficie. Adicionalmente, la estructura rugosa de la superficie de la hoja de loto contiene una cera epi - cuticular que impermeabiliza la epidermis de la planta mejorando las propiedades de baja adherencia e incrementando su repelencia al agua –haciéndola super - hidrofóbica- (Barthlott y Neinhuis 1997: 667). Por último, la propiedad de auto-limpieza, de gran interés comercial, se asocia con la baja adherencia de la superficie de la hoja de loto. Las gotas de agua pueden remover fácilmente las partículas de suciedad en la superficie de la hoja, lo que resulta en el llamado efecto de auto-limpieza.

b. Estrategias de aplicación Biomimética.

En términos generales, el potencial de muchos materiales biológicos aprovechables desde el punto de vista de las tecnologías humanas, se atribuye a la “integración funcional”, que consiste en la combinación de dos características: una estructura multi - escala (desde la escala nano, pasando por la micro, hasta la escala macro) y la multifuncionalidad, pues cumplen más de una función (Liu y Jiang 2011). Las hojas de loto han inspirado diferentes estrategias de síntesis para construir superficies hidrofóbicas; en especial, los equipos de científicos y las compañías han buscado copiar o transferir el mecanismo de auto-limpieza de las hojas de loto generando diferentes aplicaciones comerciales como pinturas, textiles, vidrios, tejas, entre otros. Las tejas auto – limpiantes

Erlus Lotus®, y la pintura Lotusan® son dos ejemplos de exitosa aplicación biomimética derivada de la nanotecnología.

La foto – catálisis y los Tejados Auto – limpiantes de Erlus Lotus®

En el año 2004, la compañía alemana Erlus AG lanza al mercado la primera teja de arcilla auto-limpiante en el mundo, bajo la marca Erlus Lotus®. Se trata de tejas cerámicas de arcilla que pueden ensamblarse para conformar un tejado y tienen como su característica principal la de auto –limpieza, la cual se consigue a partir de dos características técnicas básicas que se combinan en distintos métodos desarrollados en varias patentes (Rauser et al. 2005). En primer lugar, la hidro-fobicidad, lograda a través de la disposición de las partículas que componen la superficie de la teja tanto en la altura -entre 5 y 100 micrones- como en distancia -aproximadamente entre 5 y 200 micrones-. Igualmente se realiza un recubrimiento para la superficie de la teja con un método de “curado” de la teja, el cual implica realizar un proceso de silanización de la superficie de la teja; es decir, se cubre con hidruro de silicio para conferir la propiedad de super - hidrofobicidad a la superficie de la teja (Thierauf 2006). En segundo lugar, una cubierta con propiedades foto - catalíticas, la cual permite que la luz del sol actúe como elemento de auto - limpieza (Thierauf et al. 2010).

La primera característica mencionada de las tejas Erlus Lotus hace referencia al denominado efecto loto, el cual permite que las partículas orgánicas no se adhieran de manera permanente a la superficie, en este caso, de la teja. La fotocatalísis se consigue gracias al dióxido de titanio (TiO₂) que actúa como elemento foto - catalizador junto a luz solar, lo cual acelera el ritmo al que se desintegran los compuestos orgánicos o biológicos que se acumulan en la superficie de la teja, razón por la cual se convierte en un factor de eliminación de los contaminantes que se depositan en la superficie. Este producto está circunscrito a una serie de patentes de la compañía Erlus AG. Así por ejemplo, la patente número DE 19746053 que se denomina: “Un método para producir la propiedad auto-limpiante en las superficie, en particular de las tejas” (Thierauf 2006). Dentro de los antecedentes de este documento se encuentra la patente Número WO 1996004123, la cual precisamente corresponde a la invención de Wilhelm Barthlott “Superficies auto-limpiantes de objetos y el proceso de producción de las mismas” (Barthlott 2003).

Las tejas de Erlus han sido destacadas como las primeras tejas cerámicas para techos exteriores auto - limpiantes dada su capacidad para destruir partículas orgánicas tales como depósitos de grasa, algas, musgo, polvo y moho, usando la luz solar y la lluvia como elemento que lava los residuos generados por la reacción foto – catalítica, representativas de las tecnologías basadas en el uso del dióxido de titanio que permiten mantener las estructuras de los edificios urbanos libres de polvo y contaminantes (Augugliaro et. al 2010:162).

Las Pinturas Lotusan

La compañía inglesa Sto Corporation produce el recubrimiento exterior Lotusan Paint®, combinando dos características transferidas desde los principios característicos de la planta de loto; una microestructura rugosa (con un ángulo de contacto de 140°) y un material hidrófobo (material que repele el agua o que no se puede mezclar con ella); la unión de estas dos características, permite crear una superficie super - hidrófoba (Barthlott 2003).

El producto surge de la colaboración entre la compañía inglesa, fabricante de productos para la construcción, y el botánico alemán Wilhelm Barthlott en su proyecto de averiguar cómo las hojas de las plantas se limpian a sí mismas; buscando imitar la estructura molecular del *Nelumbo Nucifera*, lo cual consiguieron después de un proceso de cuatro años de trabajo conjunto desde la concepción inicial del proyecto. El recubrimiento exterior para fachadas de edificaciones StoCoat Lotusan que efectivamente hace que los edificios adquieran la capacidad de auto-limpieza; la superficie, además, ofrece propiedades hidrofóbicas mejoradas. Las pruebas técnicas a la efectividad de Lotusan han sido realizadas por el Instituto de Polímeros de Flörsheim, el Instituto Fraunhofer de Física de la Construcción en Holzkirchen y el Instituto de Investigación en Pigmentos y Pinturas en Stuttgart (Rouni y Kim 2006).

La compañía desarrolladora de esta pintura para exteriores reclama su carácter biomimético. En la página oficial de la empresa Sto Corp se plantea que⁴¹:

“A través de la investigación y el desarrollo de la biomimética, Sto ha replicado a la naturaleza. Nuestros esfuerzos nos han permitido combinar la biología y la tecnología de manera innovadora para producir el nuevo acabado de textura exterior con tecnología Lotus-Effect®”.

La publicación especializada “métodos en biología celular” señala a Lotusan como uno de los productos que se identifican con una aproximación biomimética que abarca desde la escala nano hasta la escala macro la cual busca identificar diseños y características propias de la naturaleza para el desarrollo de aplicaciones y producto, en el campo de la biología nanocelular (Alisson et al. 2008:63).

Por su parte, Dunster (2007) reconoce a Lotusan, como producto biomimético, es representativa de las nuevas formas de disminuir el mantenimiento de materiales en la industria de la construcción, entre un diez y un veinte por ciento más costosa que las

⁴¹ Véase <http://www.stocorp.com/index.php/en/Download-document/2335-Stolit-Lotusan-Brochure-S814.html>.

pinturas tradicionales, y tiene un mercado equivalente a siete millones de libras esterlinas por año.

Bar-Cohen (2011: 308) en su estudio de las innovaciones basadas en la naturaleza, afirma que las plantas han sido poco estudiadas -si se comparan con los animales- en el campo de la biomimética, y se señala a Lotusan como un caso excepcional, basado en la propiedad de super – hidrofobicidad.

La pintura ha sido aplicada en edificaciones emblemáticas, en proyectos multi – familiares y en edificios con destinaciones diversas: el Museo Ara Pacis en Roma-Italia, el edificio sede de la compañía de construcción Handlechner Eugendorft en Austria, la construcción Lumenart Pula en Croacia, el edificio residencial y comercial Die drei Leipzer en Berlin; el edificio residencial Heroja Tepica, en Serbia, la vivienda familiar Haller, Dachswaldweg-Stuggart (Leydecker 2008) y la propia compañía afirma que a la fecha las edificaciones que han aplicado la pintura Lotusan superan las quinientas mil⁴².

Lotusan ha recibido reconocimiento como uno de los ejemplos exitosos de aplicación biomimética en la arquitectura Gruber et al. (2011:134). Shimomura (2010:56) en su evaluación del aprendizaje derivado de la biodiversidad, en el contexto de nuevos materiales biomiméticos, considera a Lotusan como el caso exitoso inspirador de otras aplicaciones biomiméticas.

El libro “comercialización de la nanotecnología”, segmenta los mercados nanotecnológicos en sus aplicaciones orientadas hacia los sectores energético, médico y de cuidado personal, electrónico, textil, de alimentos y agrícola, materiales industriales y pinturas, y finalmente, productos de consumo. Los productos de Erlus lotus y Sto Corp en el Mercado de los nano - materiales orientados hacia la protección ambiental, en el que las partículas de dióxido de titanio consiguen que se incremente la durabilidad de productos basados en materiales orgánicos, que alcanzó un valor de 1.4 billones de dólares (Tsuzuki 2013: 53).

En su calidad de aplicación biomimética que requiere manipulación de materiales a escala nano, y por la utilización del dióxido de titanio en material cerámico, Erlus Lotus se asocia con el mercado de las nanotecnologías, el cual representa un valor de 2,5 trillones de dólares en el año 2014, en el mundo.

8.3. Emulación de la interacción entre las telas de araña y las aves: Ornilux

Ornilux es un vidrio diseñado para reducir las colisiones de aves contra las ventanas de las construcciones. Esta invención se basa en la combinación del conocimiento de la

⁴² Véase www.sto.co.uk

sensibilidad ultravioleta de las aves y el conocimiento de la reflectividad de la luz ultravioleta (UV) de la tela de araña⁴³.

“La idea de vidrio Ornilux vino de la comprensión de que las aves tienen la capacidad de ver la luz en el espectro ultravioleta, y que algunas arañas incorporan filamentos reflectantes UV de la seda en sus redes para que sean visibles para las aves. Alertar a las aves de la presencia de los hilos de la telaraña conserva la capacidad de la araña para capturar a sus presas, sin que un pájaro se cuelgue en ella”.

Por una parte, la capacidad de percibir la parte ultravioleta del espectro de la luz (la longitud de onda entre 320-400 nm) se ha detectado en al menos 35 especies de aves diurnas entre ellas principalmente en especies rapaces, frugívoras, insectívoras y nectarívoras (Rajchard 2009:351). Los estudios acerca de la importancia de la visión UV de las aves se ha enfocado en el contexto de la señalización intra e inter-sexual, la señalización de especies, la búsqueda de alimento (Veselovsky 2001; Honkavaara et al. 2002) y mejorar la navegación debido a la ampliación en la comunicación con otras especies (Tovee 1995). Por otra parte, se ha demostrado que la decoración de la tela de araña o stabilimenta (gruesas bandas visibles de seda) tiene la particularidad de reflejar el espectro de la luz UV (Craig y Bernard 1990). La función del stabilimenta de las telarañas es aún un tema controversial, no obstante, las hipótesis más estudiadas sugieren que las decoraciones de la red son un tipo de señal visual, que serviría para tres funciones distintas: en primer lugar, las decoraciones de la red aumentan el éxito de forrajeo de la araña, debido a que los filamentos de seda reflejan la luz UV, que explota un sesgo sensorial inherente de los insectos que los atrae hacia la luz UV. En segundo lugar, disuade a los depredadores como aves y avispas porque oculta la araña o advierte las características nocivas de la red. En tercer lugar, la decoración advierte, a los animales más grandes como las aves, la posición de telaraña para evitar una posible colisión y daño accidental de la red (Herberstein y Fleitsch 2003).

La idea de los vidrios Ornilux es emular la capacidad reflectividad ultravioleta de la tela de araña para que funcione como una señal visual para las aves. La patente de la invención (Arnold et al. 2012) plantea que la idea inicial de fabricar ventanas que reflejen luz UV fue desarrollada en la tesis titulada: Ver el poder del ojo de un pájaro "Sehleistung des Vogelauges" de Kristin Steigerwald⁴⁴, la cual se refiere al problema de las aves víctimas de las colisiones con los cristales de las ventanas y propone, basada en la sensibilidad ultravioleta (UV) de las aves, fijar unas bandas adhesivas verticales que reflejen la luz UV, visibles para las aves y al mismo tiempo invisible para el ojo humano.

⁴³ Véase <http://www.asknature.org/product/077e9d44e8e12f039458729f8de1ada9>

⁴⁴ Véase http://edoc.ub.uni-muenchen.de/6793/1/Steigerwald_Kristin_s.pdf

Sin embargo, los inventores de Ornilux señalan que la idea de Steigerwald solo fue una aproximación al invento final debido a que se dieron cuenta que el simple reflejo de la luz UV en la estructura, que también involucra zonas transparentes del cristal, no es un contraste suficiente para que la ventana sea segura para los pájaros. Además, indican que la sensibilidad ultravioleta de las aves no es uniforme y el color UV tiene un efecto de atracción o de rechazo dependiendo del tipo de ave (frugívoro o insectívoro). Por estas razones, se propone un vidrio con reflectividad UV análoga a la tela de araña:

“La ventana debería tener la estructura de contraste más alta cuando está utilizando la sensibilidad a los (rayos) UV de los pájaros -análoga a la reflectancia UV de la tela de araña- respecto del contraste (verde) de la vegetación de fondo, que es rica en absorción de (rayos) UV” (Cesnik et al. 2013:8).

En este sentido, la transferencia de conocimientos desde el capital natural que confiere la característica de biomimética a la tecnología desarrollado por la compañía Arnold Glass está representada en la capacidad de replicar o reproducir las propiedades reflectantes que poseen ciertas telas de araña empleando rayos UV para hacerse visibles frente a diversas especies de aves que de esta manera pueden evitar una colisión que resultaría dañina tanto para la araña y su red como para el ave. Por tanto, el hecho de dotar a todo tipo de estructuras constructivas y arquitectónicas de la capacidad de proteger sus ventanas evitando la colisión de aves en pleno vuelo, a la vez que se protege a estas especies, ha sido reconocido como una aplicación biomimética por parte de diversos autores Pacheco et al. (2014:67), López (2014: 148 y 270), Hastad y Odeen (2014), Instituto Biomimicry, entre otros. Aun reconociendo el carácter biomimético de Ornilux, es importante tener en cuenta que la aplicación humana (artificial) de esta tecnología natural ha implicado el desarrollo de ciertas características propias que difieren de las del naturfacto (telas de arañas); por ejemplo la compañía ha señalado que el patrón geométrico del recubrimiento de la ventana creado por ellos no reproduce exactamente el de la tela de araña⁴⁵.

La historia de biomimética de Ornilux, comienza en 1990 cuando el abogado alemán Alfred Meyerhuber, apasionado por las aves y la ciencia, leyó un artículo en una revista sobre la araña tejedora orbe y la stabilimenta de su tela de araña. Basado en el artículo, Meyerhuber le sugiere a Hans-Joachim Arnold, un fabricante de vidrios aislantes, dueño de la empresa Arnold Glas en Remshalden, Alemania; investigar este fenómeno biológico para desarrollar vidrios que eviten que las aves choquen contra las ventanas de los edificios⁴⁶.

⁴⁵ Véase http://www.ornilux.com/Attachments/CaseStudy_Ornilux_MASTER.pdf

⁴⁶ Ibídem

Meyerhuber y Arnold sabían que una causa de muerte frecuente en las aves era la colisión con ventanas y paredes de vidrio de los edificios modernos de gran altura⁴⁷. Por tal motivo, la empresa Arnold Glass se enfocó en desarrollar un producto que tuviera las mismas características reflectivas de la luz UV de la tela de araña.

Las pruebas para desarrollar Ornilux se llevaron a cabo en colaboración con el Instituto Max Planck para la Ornitología en Radolfzell, Alemania. El objetivo de la investigación era desarrollar un vidrio con un recubrimiento reflectivo de la luz UV, que al mismo tiempo, fuera visible para las aves e imperceptible para el ojo humano. Originalmente, se probaron 17 paneles recubiertos reflectantes UV diferentes para 19 especies europeas de aves⁴⁸. El experimento consistió en liberar aves dentro de un túnel oscuro con un panel de lado a lado de cristal transparente (invisible para las aves) y un panel de control de la prueba en el otro extremo. Finalmente, los investigadores encontraron que una capa grabada con patrones (en comparación con un recubrimiento sólido) hizo el contraste del acristalamiento más intenso: las piezas recubiertas reflejan la luz UV, mientras que la capa intermedia entre dos capas de vidrio absorbe la luz UV. El descubrimiento fue una medida preventiva efectiva para reducir las colisiones de aves en comparación con el estándar de doble acristalamiento. Con estas pruebas, en el año 2006, se lanzó en Europa ORNILUX Bird Glass Protection. Y posteriormente, en el año 2009, se produjo una nueva generación de vidrios de protección para las Aves, bajo la marca ORNILUX Mikado.

Actualmente, la mayoría de aplicaciones de Ornilux se han realizado en América del Norte y Alemania. El primero y uno de los más grandes proyectos que usó Ornilux fue el acristalamiento de una piscina cubierta en Plauen, Alemania en el año 2006. También se ha usado Ornilux, con mucho éxito, en el Zoológico de Hellabrunn y en el Centro de Información Natural en Karwendel⁴⁹. Entre algunas aplicaciones con Ornilux en Estados Unidos se encuentran: el Centro para la Conservación Mundial en el Zoológico del Bronx en Nueva York, el Refugio Nacional de Vida Salvaje John Heinz en Filadelfia⁵⁰. En Canadá, se referencian otras aplicaciones de acristalamiento con Ornilux en Centennial beach cafe un establecimiento comercial y otra en el Centro de Investigación de la Vida Silvestre en el Pacífico, ambas construcciones en la provincia de Columbia Británica⁵¹. Algunas empresas con las que Arnold Glass ha llegado a acuerdos para distribuir y fabricar Ornilux en Estados Unidos son Roeder Windows & Doors, NanaWall⁵² y Glasswerks, Inc.

⁴⁷ Drewitt y Langston (2008) y Klem (2009) estiman que millones de aves morían por esta causa anualmente en el mundo

⁴⁸ Véase <http://www.ornilux.com/development.html>

⁴⁹ Véase http://www.ornilux.com/Attachments/Strictly_for_The%20Birds_Europe_Case%20Studies.pdf

⁵⁰ Véase http://www.ornilux.com/Attachments/ORNILUX-Glasswerks_Brochure.pdf

⁵¹ Véase <http://www.hbcintegrated.com/our-solutions/ornilux/>

⁵² Véase <http://greenspec.buildinggreen.com/blogs/ornilux-bird-safe-glass>

8.4. Forma y función de las aves como solución en el sector del transporte: El tren “Shinkansen”.

El caso del tren Shinkansen demuestra el éxito de buscar soluciones en los diseños de la naturaleza para resolver problemas avanzados de ingeniería. El Japan Railways (JR) es un grupo de empresas que operan el servicio ferroviario en Japón, incluyendo su red de alta velocidad, la línea de “trenes bala” Shinkansen (Shinkansen bullet train). En octubre del año 1964, se abrió la primera línea ferroviaria Shinkansen denominada Tokaido para conectar las ciudades de Tokio y Osaka, reduciendo el tiempo de viaje con una velocidad máxima de 210km/h. El éxito del Tokaido Shinkansen motivó, en los años siguientes, la expansión de la línea ferroviaria Shinkansen en la mayor parte de las ciudades de Japón; por ejemplo las líneas Sanyo, Tohoku, Joetsu; entre otras (Hood 2006).

Con el tiempo, los ingenieros y científicos japoneses buscaron diseñar modelos de trenes más rápidos que pudieran alcanzar velocidades de 300km/h o más, lo que naturalmente, generó muchos problemas de ingeniería que superar. Dentro de los problemas a resolver se encontraban, por una parte, reducir el ruido aerodinámico generado cuando el aire golpea pantógrafos, los colectores de corriente que reciben la electricidad de los cables aéreos. Por otra parte, los ingenieros buscaban reducir las vibraciones intensas que se generan cuando el tren atraviesa túneles (Japan for Sustainability 2005).

Uno de los ingenieros responsables del desarrollo de la tecnología Shinkansen, Eiji Nakatsu era miembro de la Sociedad de Aves Silvestres del Japón. En una conferencia, el ingeniero Nakatsu aprendió que el diseño tecnológico actual de las aeronaves está basado en estudios de las funciones y estructuras de las aves. Este nuevo conocimiento motiva el estudio de aves que puedan ayudarlo a él y a su equipo a resolver el problema del ruido del tren Shinkansen. En su búsqueda, Nakatsu encontró que la familia de búhos son las aves que tienen el vuelo más silencioso entre todas las aves. Los diseñadores e ingenieros japoneses estudiaron el plumaje de los búhos y realizaron pruebas para entender el funcionamiento del diseño de las alas de estos pájaros⁵³:

“Inspirado en este hecho, llevamos a cabo pruebas en el túnel de viento para analizar el nivel de ruido de un ave volando, usando un búho disecado del Zoológico Municipal de Tennoji Osaka. Aprendimos que uno de los secretos del bajo ruido del vuelo de la familia del búho es que en su plumaje, el ala tiene muchas pequeñas plumas dientes de sierra que sobresalen del borde exterior de sus plumas primarias. Otras aves no tienen estas plumas. Estas plumas de onda serrada se llaman “plumas dentadas,” y generan pequeños vórtices en el flujo de aire, que rompen los vórtices más grandes que producen ruido. Nos tomó 4 años de arduo esfuerzo por parte de nuestros ingenieros más jóvenes para aplicar este

⁵³ Véase http://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id027795.html

principio. Por último, "dientes de sierra" fueron incluidos en la parte principal del pantógrafo, y esto consiguió reducir el ruido suficiente para cumplir con las normas más estrictas del mundo. Esta tecnología se denomina: generador de vórtice" (Japan for Sustainability 2005).

El otro problema a resolver para los ingenieros japoneses, era las ondas de presión atmosférica que se generan cuando el tren se acerca a un túnel a gran velocidad, en la línea Sanyo Shinkansen, que recorre el trayecto entre las ciudades de Osaka y Hakata. Al salir del túnel a la velocidad del sonido, se forman ondas de baja frecuencia que producen un gran ruido y vibración intensa, molesta para los residentes cercanos. Esta vez abordado el problema de manera más sistemática, con la experiencia exitosa del diseño basado en las alas del búho, Nakatsu y su equipo de ingenieros, buscaron un modelo natural que no produjera efectos en el entorno, cuando se enfrente a cambios en la resistencia del aire. Con esta idea, encontraron que una especie de ave, el martín pescador (*Alcedo atthis*), por la forma de su pico puede atrapar a su presa haciendo inmersión desde el aire hasta el agua, con pocas distorsiones en la superficie acuática:

"Entonces, uno de nuestros jóvenes ingenieros me dijo que cuando el tren se aproxima a prisa en un túnel, sintió como si el tren se hubiese contraído. Esto debió ser provocado por un cambio repentino en la resistencia del aire, pensé. La pregunta que me surgió fue ¿hay algo vivo que maneja los cambios repentinos en la resistencia del aire como parte de la vida diaria?...Sí, existe, el martín pescador. Para atrapar a su presa, un martín pescador se zambulle desde el aire, que tiene baja resistencia, en agua de alta resistencia, y además lo hace sin salpicar. Me preguntaba si esto es posible debido al borde afilado y la forma aerodinámica de su pico" (Japan for Sustainability 2005).

De esta manera, la mejora en la tecnología, se basa en la capacidad natural del Martín pescador de sumergirse en el agua a altas velocidades para capturar su presa sin salpicaduras, aprovechando las propiedades aerodinámicas de su pico sin producir mayor ondulación en el agua dejando a su presa sin posibilidades de escape, al no contar con señales de advertencia sobre la amenaza que representa su depredador Wegmann (2010:186). Los diseñadores relacionaron adecuadamente el problema técnico humano de vibración generadas por el Shinkansen con la configuración del pico del martin pescador que resolve el problema de minimizar las ondas cuando entraba al agua. Posteriormente, investigadores japoneses de la empresa de trenes realizaron pruebas de simulación para probar el funcionamiento de los trenes en túneles modificando el morro del tren. Como resultado final se obtuvo que la forma ideal para el diseño de la nariz del Shinkansen era casi idéntica al pico de un martín pescador. La modificación de la estructura del tren original resultó ser más eficiente, según Hosey (2012:39) la remodelación de la nariz del tren bala shinkans emulando el pico del martín pescador, permite que el tren se mueva un 10% más rápido y más tranquilo usando un 15% menos de energía.

En la historia de rediseño del shinkansen se considera indispensable la experiencia de bioinspiración de otras tecnologías - por ejemplo el aeroplano- para que el shinkansen se modificara basándose en la estructura y aerodinámica de las aves, lo cual eleva la importancia de las tecnologías basadas en el capital natural como promotor de avances tecnológicos que también involucren principios naturales. Después con la observación y la comprensión de las técnicas naturales del vuelo silencioso de la familia de los búhos y la forma en que se zambulle el martín pescador en el agua, surge el aprendizaje biomimético que resuelve los problemas de ingeniería avanzada a los que se enfrentaban diseñadores e ingenieros del Shinkansen.

Rankouhi (2012) destaca el enfoque biomimético que adoptó la investigación de la JR West en el rediseño de la tecnología del tren shinkansen debido a la imitación del modelo biológico del pico del martín pescador que usó como 'forma básica' de la parte frontal de cabeza vehículo. Kim y Lee (2012) compara los diseños de los trenes de altas velocidades con el shinkansen biomimético (modelo Serie 500), a través de un análisis morfométrico. El análisis del autor muestra que las características de la forma de biomimética impulsan un modelo de diseño muy diferente a la de los otros trenes. De esta manera, el proceso de diseño biomimético proporciona una solución muy importante para superar los límites de ingeniería en cuanto a resistencia aerodinámica, vibración, ruido, entre otros; muy distante de la creatividad de diseño vaga.

8.5. Turbinas de viento basadas en las aletas de las ballenas: Whalepower

La historia de biomimética de Whalepower comienza cuando Frank Fish, un profesor de biología de la Universidad del Estado de Michigan con doctorado en Zoología y conocedor de la hidrodinámica y biomecánica animal, observó la ubicación de tubérculos o protuberancias en la aleta de una ballena jorobada⁵⁴:

“[Fish] examinó una escultura de una ballena jorobada en una tienda y expresó una observación fatalmente inexacta: Mira eso. El escultor puso las protuberancias en el lado equivocado de la aleta. La gerente de la tienda rápidamente le indicó lo correcto. Ella estaba al tanto del trabajo del escultor y de su conocimiento acerca de las ballenas jorobadas: Ahí es donde las protuberancias deben estar. Una revisión rápida y Frank, estaba convencido de que el artista estaba en lo correcto. Pero si el artista estaba en lo correcto, al menos, parte de la ciencia de la dinámica de fluidos estaba equivocada...”

Interesado en conocer el funcionamiento de esta revelación, el Dr. Fish, en su laboratorio, y con su equipo de trabajo comenzó la investigación. En el año 2002, junto con el Dr. Philip

⁵⁴ Véase <http://www.whalepower.com/drupal/?q=node/1>

Watts obtuvieron la patente de la innovación denominada Ala con bordes ondulados prominentes (Scalloped wing leading edge), la cual consistía en:

“La invención modifica un ala con el propósito de proporcionar una mayor razón entre la elevación y la fricción en comparación con alas similares con bordes recta. Para alas extendidas en una dirección lateral, y definiendo una dirección longitudinal contracorriente, el aparato forma un borde frontal que se extiende lateralmente orientada en dirección contracorriente. El aparato forma una pluralidad de protuberancias espaciadas lateralmente a lo largo del borde frontal, las protuberancias crean una variación suave, alternando el barrido hacia adelante y hacia atrás a lo largo del borde frontal en relación a la dirección del flujo contracorriente a lo largo del borde frontal” (Watts y Fish 2002: 1).

La idea de colocar protuberancias en las alas no se había desarrollado anteriormente porque se consideraba contraintuitiva. Debido a que el conocimiento hasta ese momento, hacía pensar que las protuberancias podrían interrumpir el flujo y por tanto aumentar la resistencia que el ala experimentaba cuando pasaba a través del agua o el aire. La apreciación del profesor Fish sobre las protuberancias en la aleta de la ballena jorobada permitió avanzar en el conocimiento de los diseños aerodinámicos naturales que mejoran el desplazamiento de un cuerpo en los fluidos. Las investigaciones de Whalepower han concluido que las protuberancias en los bordes no aumentan la resistencia y que incluso, a medida que avanza hasta los ángulos más altos, se reduce la resistencia en comparación con un ala que no tiene estas protuberancias⁵⁵. El profesor Fisher explicó en una entrevista radial de la BBC, cómo funcionan las protuberancias en el flujo del aire o el agua⁵⁶:

“...si usted tiene una estructura de ala, como tomar su mano y ponerla fuera de la ventana del auto y juega al aeroplano; lo que va a pasar es que el ala modificará el flujo de aire. Esto empuja hacia abajo [el ala]...obtiendo fuerza de elevación cuando se levanta el ángulo del ala. Y eso ocurre hasta un punto en particular, en el cual la mano o el ala pasará a través de lo que se llama 'estacamiento' cuando el ángulo es demasiado grande debido a que el flujo de aire o de agua no pueden moverse a su alrededor de una manera controlada. El estacamiento es algo que usted no quiere que suceda. Es horrible cuando sucede en un avión, pero en la ballena jorobada, las protuberancias permiten aumentar el ángulo teniendo la aleta dirigida hacia el flujo, sin estancarse”.

En el año 2004, Watts, Fish y el empresario canadiense Stephen Dewar crean la empresa WhalePower para desarrollar aplicaciones de la tecnología de tubérculo en una amplia variedad de dispositivos con posibilidades comerciales como las piezas de embarcaciones,

⁵⁵ Véase <http://www.thenakedscientists.com/HTML/content/interviews/interview/1282/>

⁵⁶ Ibídem

alas de avión y turbinas industriales, las cuales se soportaban en el derecho exclusivo de la patente de la invención.

Posteriormente, el inventor Fish y el consultor de la Armada de los Estados Unidos Dr. Howle Laurens, realizaron unas pruebas, en colaboración de la Oficina de Investigación Naval, el Consejo de Investigación de la Académica Naval, y el personal técnico de la Academia Naval de los Estados Unidos, para saber cuál es el impacto de agregarle tubérculos a los borde de las alas de la turbina sobre la eficacia, especialmente a velocidades de flujo más bajas. Como trabajo de investigación previo, estos científicos estudian las capacidades de las aletas de la ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) para darle movilidad en la ejecución de maniobras acrobáticas submarinas. En particular, después de experimentos en túnel de viento, concluyen que el modelo a escala de aleta de ballena jorobada (adicionando tubérculos) retrasa el ángulo de estancamiento en aproximadamente 40%, al mismo tiempo que aumenta la elevación y disminuye la resistencia (Miklosovic et al. 2004:39). Un año después, la investigación se enfoca en el diseño de tres diferentes láminas, una de diseño básico y dos modificadas con tubérculos. Los resultados del estudio evidenciaban que en todos los criterios de la prueba, las hojas modificadas con tubérculos superaban ampliamente a las hojas de diseño liso (Murray et al. 2005).

Actualmente la tecnología se ha aplicado a ventiladores industriales, en donde las aspas tienen protuberancias similares a las que se observan en las aletas de las ballenas jorobadas. Según la empresa Whalepower dentro de los beneficios de este diseño tecnológico se encuentran un menor uso de materiales, abaratando costos y una mayor eficiencia de operación con lo que gasta menos energía.

Esta tecnología ha sido reconocida como biomimética por distintos autores. Abdelmalek (2013) plantea que el uso de tubérculos en las cuchillas de las turbinas de viento es un ejemplo de biomimética porque en primer lugar transfiere la estructura desde el fenómeno biológico al diseño tecnológico humano y; en segundo lugar, le confiere a la invención la misma funcionalidad de los tubérculos de la aleta de la ballena jorobada; debido a que, se mejora el flujo hidro y aerodinámico por incrementar la elevación, disminuir la fricción e incrementar el ángulo máximo de ataque. Además del desarrollo de la tecnología, los estudios de Fish y su equipo de investigadores, acerca del efecto dinámico de los tubérculos encontrados en las aletas de las ballenas jorobadas sobre el flujo del fluido, han sido señalados como un descubrimiento científico importante para la comprensión de la dinámica de los fluidos y base teórica fundamental para el desarrollo de muchas tecnologías humanas (Maglic 2014).

Por otra parte, el profesor Fish ha encaminado parte de su producción académica a desarrollos científicos con enfoque bioinspirado y biomimético⁵⁷. Por ejemplo en un estudio, Fish (2006a) considera la inspiración en la biología para hacer diseños que reduzcan la resistencia de las embarcaciones marinas. El autor destaca la habilidad y rendimiento de alta velocidad de los delfines y, examina los mecanismos de reducción de la fricción hidrodinámica, asociada con estos cetáceos, que puedan generar adaptaciones al diseño de sistemas de ingeniería análogas al modelo natural, reduciendo la resistencia y disminuyendo el costo energético de la natación. En otro estudio, Fish (2006b) revisa la influencia creciente de la biomimética y los diseños inspirados en la biología en la robótica. Dentro de las soluciones de la naturaleza que pueden mejorar los diseños de ingeniería, el autor propone hélices oscilantes, alas flexibles, control del vórtice activo, sistemas de propulsión auto-estabilizables y auto-correctivos; entre otros.

También, Fish (2009) se ha referido a las limitaciones del enfoque biomimético como un mecanismo para el avance tecnológico. El autor señala que el éxito en la copia de la naturaleza no está garantizado, éste depende de diversos factores como las diferencias estructurales y mecánicas de las dos tecnologías y el proceso por el cual surge cada una de las tecnologías, incluso sostiene que la naturaleza no provee todas las soluciones óptimas. Aun así, Fish admite que en ciertos casos los organismos tienen un rendimiento superior al diseño humano, por lo cual las características de esos organismos serán objeto de transferencia de tecnología.

Los aportes a la conceptualización de la bioinspiración y la biomimética se presentan en Weber et al. (2009), un artículo en el que participa Fish, donde proponen una discusión sobre la copia exacta de los diseños biológicos. Los investigadores argumentan que la imitación de los fenómenos naturales para aplicaciones prácticas se hace a menudo de una manera idealizada, es decir, se busca mediante un modelo idealizado o representación capturar las características ventajosas del fenómeno natural sin tener que replicar exactamente. Los resultados de los experimentos muestran que la adhesión estricta a los diseños biológicos rara vez produce resultados prácticos. En contraste, los modelos idealizados capturan los efectos relevantes de manera adecuada un fenómeno que se encuentra en la naturaleza, lo cual evita crear modelos minuciosamente exactas.

8.6. Purificación de aguas basada en la Transferencia de conocimientos desde el remolino natural: Vortex Generator

La tecnología Vortex Process Technology (VPT) desarrollada por los investigadores Lars Johansson, Morten Ovesen y Curt Hallberg del Instituto de Tecnología Ecológica de Malmö (autodenominado como “el equipo de Malmö”) es uno de los ejemplos de transferencia de conocimientos tecnológicos desde un fenómeno natural concreto (el remolino) hacia

⁵⁷ Véase <http://darwin.wcupa.edu/~biology/fish/pubs/>

una tecnología humana (la VPT) a través de la decodificación de los mecanismos mediante los que opera el proceso natural empleando conocimientos científicos especializados (dinámica de fluidos, dinámica caótica, entre otros) y su adaptación a necesidades tecnológicas humanas (métodos eficientes para la purificación de agua).

La tecnología VPT desarrollada por la empresa sueca Watreco, es un generador diseñado para producir remolinos de manera controlada, consta de tres componentes que representan las etapas del proceso de formación de remolinos; en primer lugar está la entrada que direcciona suavemente el flujo de agua a través de un movimiento toroidal hacia un conjunto de canales. En estos canales se desarrolla la segunda etapa en la que la geometría del dispositivo conduce a la formación de remolinos. Finalmente en la cámara de remolinos, se forma un remolino fuerte y estable. Dependiendo de la aplicación que se quiera realizar la cámara de los remolinos puede tener formas diferentes, por ejemplo la forma de trompeta produce un remolino bien definido con una transición suave hacia las tuberías de desagüe. Una forma de huevo causa una propagación del fluido que puede ser utilizada en aplicaciones que requieran pulverización⁵⁸.

La tecnología está patentada, y la revisión del texto de la patente denominada “generador de vórtice” (vortex generator) de Ovesen y Hallberg (2011) permite verificar las características técnicas de cada una de estas etapas y componentes e incluye una descripción de las ecuaciones que definen la forma del dispositivo (trompeta o huevo).

Esta tecnología ha sido tomada como un caso representativo de las nuevas áreas de negocio asociadas a lo que ellos llaman: “Economía Azul” (Blue Economy), por investigadores de la Escuela de Gobierno del instituto Humboldt-Viadrina en Berlín, en referencia a un conjunto de innovaciones que tienen en común su potencial para generar mercados y empleos en torno a productos amigables con el medio ambiente⁵⁹.

El fenómeno natural que motivó el desarrollo de esta tecnología es el remolino, el cual puede definirse como un fluido en rotación alrededor de un eje o como un flujo con rotación en espiral que exhibe una trayectoria cerrada y se expresa en la naturaleza en diversas formas: tornados, huracanes, ciclones, vórtices en el agua de los ríos o incluso la taza de café que tomamos en la mañana. La fascinación por este fenómeno natural ha inquietado a diferentes pensadores, científicos e investigadores y puede remontarse - cuando menos- a los escritos de Aristóteles:

“Estas masas de fluidos en rotación han fascinado a la humanidad desde sus albores: Aristóteles o Descartes explicaron la formación de la Tierra, su gravedad y la dinámica del Sistema Solar, a base de teorías que involucraban fluidos en

⁵⁸ Véase http://www.watreco.com/eng_omwatreco_vpt.php

⁵⁹ Véase <http://www.blueeconomy.eu/m/articles/view/Vortex>

rotación. Actualmente, la rotación de fluidos, tiene un gran interés para los científicos en diferentes campos como pueden ser la mecánica de fluidos, la superconductividad, la superfluidez, la propagación de la luz, la condensación de Bose-Einstein, la cosmología, la biociencia, o la física del estado sólido”. (Manjón et al. 2013: 1).

Y fue precisamente la búsqueda de una comprensión científica profunda acerca de los remolinos de agua y las posibilidades de emplearlos como instrumento para la purificación de agua (utilizando su capacidad de separación del fluido líquido y las partículas suspendidas), la motivación que llevó al equipo de Malmö a seguir las huellas del trabajo experimental desarrollado en la década de los años cincuenta por el naturalista austriaco Viktor Schauburger sobre los fluidos hidráulicos.

En el documento técnico titulado “Tecnología de flujo auto-organizador: Siguiendo los pasos de Viktor Schauburger” (“Self organizing flow technology”), los inventores de la tecnología VPT documentan y reportan con gran nivel de precisión el origen de esta tecnología en la réplica que realizaron en los años noventa (entre los años de 1995 y 1997) de los experimentos con remolinos de agua originalmente diseñados y ejecutados por Schauburger en el año de 1952. En esta publicación proponen la aplicación de una nueva perspectiva sobre los descubrimientos e hipótesis de Schauburger en relación a la estabilidad estructural que caracteriza a los cursos de agua naturales no manipulados por el hombre, en la cual desempeña un rol fundamental los vórtices:

“Esta es la perspectiva que traemos a ustedes en este reporte, consiste en reinterpretar y re-examinar partes de los experimentos de Stuttgart y algunas de sus posibles aplicaciones. Replicaremos algunos de esos experimentos y desde ellos trataremos de evolucionar hacia modelos útiles, los cuales puedan ayudar a hacer un puente entre la perspectiva de Viktor Schauburger y la correspondiente a las ciencias naturales modernas. Esto conduce naturalmente a algunas de las principales aplicaciones para el tratamiento de aguas y la restauración de caudales de agua” (Johansson, Ovesen y Hallberg 2002: 5).

Las conclusiones principales de su estudio, les permiten encontrar una tecnología eficaz para diversas aplicaciones relacionadas con la purificación de aguas en contextos industriales, aguas residuales, aguas para el consumo doméstico, restauración de caudales de agua, estanques y lagos. Todas las aplicaciones propuestas están basadas en una tecnología inicialmente denominada por ellos Tecnología del flujo auto-organizador “Self organizing flow technology”, en la cual se destacan los siguientes aspectos: la capacidad de separación de partículas y sólidos suspendidos en el agua a través de la tecnología del Hidrociclón (el cual es un tubo de forma cónica) y el principio de separación auto-organizador. Adicionalmente, encontraron que la separación de partículas era más eficiente si los dispositivos tienen forma de huevo o de trompeta.

Los inventores reportan a la Asociación Sueca para la Nueva Física (Swedish Association for New Physics) que el origen de sus descubrimientos se basa en el intento de replicar los experimentos de Schauberger⁶⁰; y construyen una página web dedicada a difundir y dar a conocer las ideas de Viktor Schauberger, denominada el mundo del vórtice “the vortex world”⁶¹, en la que pueden encontrarse diferentes teorías y experimentos relacionados con el tratamiento de aguas y elementos biográficos de Schauberger, quien ha sido considerado como un pionero de la eco-tecnología o desarrollo de tecnologías en armonía con los principios de la naturaleza y se resalta su filosofía respecto de la relación del ser humano y la naturaleza según la cual la humanidad debe estudiar y aprender de la naturaleza en vez de tratar de corregirla:

“La inspiración de Schauberger proviene del estudio del agua en los arroyos de los Alpes vírgenes austriacos, donde trabajaba como guardabosques. A partir de sus astutas observaciones, se convirtió en un ingeniero autodidacto...” (Bartholomew 2004: 8)

Schauberger, es pues, uno de los pioneros en el campo de la bioinspiración y la biomimética en los planos filosófico, experimental y de desarrollo de tecnologías; algunas propuestas y análisis pueden ser encontrados en su libro *La Naturaleza como maestro* “Nature as Teacher”. Igualmente algunas de las 13 patentes solicitadas por él, pueden encontrarse en el libro: *El mago del agua: Las propiedades extraordinarias del Agua natural de Viktor Schauberger* “The Water Wizard The Extraordinary Properties of Natural Water”.

Por otra parte, algunas de las pruebas independientes realizadas a esta tecnología, identifican sus fortalezas y debilidades. Ribordy (2011) busca determinar si el generador de vórtices tiene la capacidad de producir oxigenación aeróbica y anaeróbica en aguas residuales, mediante la comparación entre el rendimiento de los generadores de vórtice de la tecnología de Watreco con otros sistemas que se encuentran en la literatura. Con pruebas de campo ejecutadas en Hammarby Sjöstadswerk con un dispositivo prototipo aireador AE120, llegando a la conclusión de que, efectivamente se produjo la oxigenación de las aguas residuales, se verificó el proceso de nitrificación anaeróbica de las aguas residuales, y la eficiencia en términos de la aireación presentaron valores más bajos que los encontrados en la de otros dispositivos. Entre otros resultados de este estudio, se verificó que el uso activo del prototipo VPT mejora las propiedades de sedimentación del lodo presente en las aguas residuales.

⁶⁰ Véase http://www.newphysics.se/archives/fnysik/1_2/vattenrening/

⁶¹ Véase <http://www.vortex-world.org/>

Adicionalmente, Vagnell (2013) realizó un estudio piloto de la tecnología VPT en la irrigación de cultivos de tomates para examinar la diferencia entre el agua tratada y el agua no tratada sobre el crecimiento de las plantas. El estudio concluyó que el uso de la tecnología de Watreco efectivamente mejoró tanto el tamaño de las plantas.

Este ejercicio exitoso de transferencia de principios naturales hacia tecnologías humanas de purificación de agua fue posible gracias a la aplicación de modelos de dinámica no lineal a la descripción del comportamiento de las partículas, los recipientes, los remolinos y la dinámica de estos elementos conformando un sistema; lo cual condujo a una comprensión detallada del comportamiento dinámico del remolino, destacándose el movimiento de tipo toroidal, la aparición de bifurcaciones y movimientos de dinámica caótica, constituyendo una aplicación biomimética en el mercado.

8.7. El Sistema de Apertura y Cierre del Velcro®

El Velcro® es un sistema de apertura y cierre práctico basado en el principio de gancho y bucle de los cardos de la planta *Arctium bardana*. La historia del velcro comienza en 1948 cuando el ingeniero suizo George De Mestral fue a un viaje de caza en las montañas de Jura con su perro. A De Mestral le llamó la atención que sus pantalones y el pelaje de su perro tenían adheridos, con gran fuerza de agarre, unas flores del cardo de alpino⁶²:

“Era muy difícil desenganchar las flores del cardo alpino que Mestral estaba intrigado, y las examinó bajo el microscopio. Descubrió [De Mestral] que las flores estaban cubiertas por cientos de pequeños ganchos que actuaban como resistentes garfios y de esta forma se pegaban al pelo de los animales y a los textiles”

Inspirado por la naturaleza de los cardos, realizó unos primeros intentos, pero los lazos eran muy grandes para los ganchos, o viceversa. A finales de 1940, diseñó telares para producir materiales con el mismo gancho y mecanismo de sujeción que el diseño natural. A principios de 1950, descubrió que el nylon, cuando se cose con luz infrarroja, forma unos ganchos más fuertes, y sustituyó al algodón como materia prima. De Mestral con el tiempo y muchos esfuerzos, a partir de una idea surgida de un suceso accidental, pasaría a inventar un revolucionario sistema de cierre que no se bloqueaba y que superaba, por su sencillez y su resistencia, a otros sistemas precedentes.

En el año 1951, De Mestral solicita la patente al gobierno suizo. El invento se denominó Velcro, el cual es la combinación de las sílabas iniciales de las palabras francesas Velours (que significa “de terciopelo”) y Crochet (que significa “gancho”). De Mestral, en 1952

⁶² Véase para la historia del Velcro® <http://www.aps.org/publications/apsnews/200402/history.cfm>

fundó su propia compañía, Velcro SA, en Suiza para la fabricación de su nuevo cierre. En varios países europeos obtuvo la patente, incluyendo suiza, y en el año 1955 en los Estados Unidos De Mestral (1955). En 1958 se registró oficialmente la marca comercial Velcro®.

Muchos autores han señalado al Velcro como un caso icónico de referencia histórica para el desarrollo de la biomimética. Lacerda et al. (2011:5) clasifica al Velcro® como uno de los primeros proyectos de biónica en la ingeniería textil, que utiliza la forma y la mecánica de un cuerpo de adhesión a los cierres. Otros especialistas en el análisis de la biomimética, consideran el desarrollo del velcro® como una aplicación comercialmente exitosa de un producto inspirado en fenómenos que ocurren en diversos ámbitos del mundo natural, para los cuales no se requirió conocimiento teórico acerca del funcionamiento del mecanismo natural:

“Los ganchos ocurren en la naturaleza con una amplia gama de diseños en una diversidad de animales y plantas (Nachtigall 1974) y tienen una gran aplicación comercial, destacado cuando el Velcro fue desarrollado. No se hizo ningún tratamiento teórico de los ganchos del cardo, el concepto se desarrolló hacia la producción más barata y más confiable de ganchos que juntan superficies”... En la actualidad hay más de 1700 patentes citando velcro, que se refieren ya sea a nuevos usos del material o a mejoras” (Vincent y Mann 2002: 171).

Vicent y Mann (2002) consideran que el velcro® hace parte de un proceso denominado transferencia sistemática de tecnología desde la biología hacia la ingeniería. Desde el punto de vista de la biomecánica, Vogel (2000: 298-300) ha analizado el caso del Velcro® como una muestra exitosa de copia humana de una tecnología natural. A pesar de que el Velcro® fue desarrollado sin la existencia de estudios científicos que demostraran los principios biológicos y físicos subyacentes, en la actualidad, se han verificado muchas de sus propiedades. Pugno (2007) describe los principios de mecánica no lineal que caracterizan desde un punto de vista físico, las capacidades de sujeción, la fortalece y efectividad del Velcro®.

A partir del año 1960, el Velcro® fue introducido al mercado pero no obtuvo éxito inmediato. Fue hasta después del uso por parte de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA) que el Velcro® se popularizó. Actualmente, el Velcro® se emplea para numerosos bienes de consumo (prendas de vestir, artículos de aseo, del hogar, deportivos, partes del automóviles), maquinarias (aparatos médicos, equipos aeronáuticos), entre otros. Según un informe de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual “World Intellectual Property Organization” (WIPO) el Velcro®, en sus comienzos, era una pequeña empresa que ganaba \$60 dólares por semana a pasar a tener una rentabilidad de \$93 millones de dólares, en el año 1988. Una década después, en el año 1996, la rentabilidad seguía incrementándose alcanzando ventas de \$

177 millones de dólares. En el año 2008, la compañía cumplía 50 años desde su creación y ganaba \$ 298 millones de dólares⁶³, convirtiéndose en uno de los inventos biomiméticos con éxito en ventas.

8.8. Tecnologías de preservación biológica a temperatura ambiente basadas en la anhidrobiosis.

El aprendizaje desde el capital natural ha alcanzado tal nivel de sofisticación, que está implicando la ruptura de paradigmas en diversos campos de desarrollo tecnológico. En el caso de las tecnologías para el almacenamiento y conservación de muestras biológicas (células, ADN, glóbulos, vacunas y virus, entre otros), el aprovechamiento biomimético ha permitido la replicación del proceso de anhidrobiosis (vida sin agua) característico de los tardígrados (el oso de agua), vegetales (semillas, polen) y moluscos (artemia franciscana), para conseguir métodos de almacenamiento a temperatura ambiente, como alternativa frente a la tradicional tecnología de conservación por enfriamiento, implicando menores costos energéticos, al punto que un analista de este mercado ha hablado de que “los congeladores arden”, ante la amenaza competitiva que representan las nuevas tecnologías biomiméticas (Blow 2009).

La criptobiosis o suspensión de los estados metabólicos en los seres vivos es uno de los fenómenos naturales más fascinantes, puesto que implica procesos que permiten la supervivencia de un ser vivo suspende sus principales funciones vitales temporalmente, lo que lo hace parecer como un organismo muerto que es capaz de revivir. Las condiciones que pueden llevar a un organismo a utilizar el estado de criptobiosis son las condiciones ambientales adversas de desecación o ausencia de agua (anhidrobiosis), congelamiento (criobiosis), falta de oxígeno (anoxibiosis), altas concentraciones de sal (osmobiosis) y altos niveles de toxinas (quimiobiosis). El estudio científico del fenómeno se remonta más de 300 años atrás con el descubrimiento del fenómeno por parte del naturalista Antony van Leeuwenhoek, pasando por los naturalistas franceses F. Pouchet y P. Doyère en el siglo diecinueve, por D. Keilin quien revivió el interés por el tema a finales de la década de los años cincuenta (Wright 2001).

Los dos estudiosos contemporáneos más destacados son los profesores James S. Clegg y John H. Crowe, quienes han hecho contribuciones que han llevado a la identificación de los mecanismos más importantes en el campo de la anhidrobiosis, la forma de criptobiosis en la que más resultados han sido alcanzados. Estos mecanismos son el reemplazo del agua y la vitrificación, en los cuales es fundamental la presencia de las proteínas LEA (llamadas así por su sigla en inglés proveniente de “Late Embryogenesis Abundant”).

⁶³ Véase <http://www.wipo.int/ipadvantage/en/details.jsp?id=2658>

El primero de ellos consiste en la presencia de polisacáridos (azúcares) que protegen las macromoléculas y membranas del organismo vivo de los efectos perjudiciales que podría conllevar la pérdida total de agua; la vitrificación, por su parte, consiste en la formación de cristales amorfos que reemplazan al agua perdida en el proceso de desecación del organismo (Clegg, 2001). Por su parte, las proteínas LEA, están presentes en organismos vivos expuestos a procesos de estrés osmótico generado por diversos agentes ambientales tales como la deshidratación, la salinidad, el frío o el congelamiento (Moreno 2009) y está claro que la mezcla de azúcares (trehalosa) y proteínas (LEA) es fundamental para la conformación de los cristales citoplasmáticos, esenciales en el proceso de anhidrobiosis (Crowe et al. 2005).

El elemento clave para el proceso de anhidrobiosis es la trehalosa, un azúcar doble o disacárido que se encuentra en grandes concentraciones en los organismos de los seres vivos que experimentan la suspensión de su metabolismo, el cual se caracteriza por su habilidad para formar cristales. Los ejemplos más notables de organismos que experimentan la anhidrobiosis son los de la *Artemia Franciscana*, un crustáceo que tiene el equivalente al 15% de su peso desecado en trehalosa, soporta la desecación total al igual que varios ciclos de deshidratación y rehidratación, siendo capaz también de sobrevivir después de ser expuesto al espacio exterior al planeta tierra (Clegg 2001).

Las dos tecnologías de preservación de muestras biológicas a temperatura ambiente que se presentan a continuación constituyen ejemplos de desarrollos que conjugan aprovechamientos biomiméticos, bioinspirados y de bioutilización, que representan un aprovechamiento singular de las tecnologías naturales, basados en las lecciones derivadas de los descubrimientos alcanzados por la ciencia básica, tal y como lo señala John Crowe:

“Así, hemos cerrado el ciclo en las últimas décadas sobre los requisitos para la estabilización de las células en estado seco; hace 34 años, hemos sugerido que la supervivencia de las células vivas en estado seco, es un fenómeno complejo que es probable involucra múltiples adaptaciones ... Con el descubrimiento de que las membranas y proteínas ... y plaquetas humanas ... pueden ser estabilizadas por la simple perturbación de adición de trehalosa, hemos sugerido que esta única lección de la naturaleza podría ser suficiente ... al menos en condiciones ideales de almacenamiento” (Crowe et al. 2005:817).

Los desarrollos de productos comerciales por parte de Stabilitech y Biomátrica constituyen innovaciones que se basan en los resultados de la investigación básica sobre el fenómeno de la criptobiosis:

“La historia de la ciencia revela que la investigación básica bien ejecutada, a veces da lugar a resultados totalmente imprevisibles que han demostrado ser de

importancia sustancial a la condición humana. El estudio de criptobiosis ofrece ejemplos de este tipo” (Clegg 2001: 620).

La posibilidad de encontrar un método para la desecación o conservación de células que puedan conservarse durante largos períodos de tiempo y después ser recuperadas tras la agregación de agua, replicando el proceso de anhidrobiosis, es una realidad gracias a las compañías Stabilitech y Biomátrica.

Aprendizaje derivado de la estabilización térmica de semillas en Stabilitech.

La compañía inglesa Stabilitech, fundada en el año 2004 por el Doctor Jeff Drew, un virólogo molecular, representa un ejercicio exitoso de transferencia de conocimientos desde el ámbito natural hacia la aplicación de tecnologías novedosas. Como ejercicio de Bioinspiración, se remite a las lecturas acerca de las propiedades biológicas de las semillas. Steven Buckingham en el artículo titulado “Copying Nature” (copiando a la naturaleza), describe la estrategia adoptada por parte de Dr. Jeff Drew para encontrar la combinación de componentes químicos o excipientes que resulta más eficaz en la conservación de vacunas. Esta aproximación “multivariada” consistió en la búsqueda sistemática de tales excipientes entre un amplio rango de candidatos posibles, hasta encontrar la mezcla que, reemplazando al agua perdida por la muestra biológica, protegiéndola hasta ser rehidratada de nuevo. En el mismo artículo, el Dr. Drew declara que:

“Entonces, ¿cómo fue que llegué a la estabilización de vacuna? "Para ser honesto, estaba un poco aburrido", recuerda Drew, "y comencé a re-leer acerca de cómo las semillas almacenan cosas." La lectura de Drew llamó su atención hacia ciertas proteínas que aparecen en niveles altos, únicamente cuando la semilla se está formado” (Buckingham 2011:38).

Además de reconocer la inspiración obtenida a partir del conocimiento de las propiedades anhidrobióticas de las semillas, el Dr. Drew señala claramente el carácter biomimético de su tecnología en una solicitud de patente presentada por en el año 2008:

“En la presente invención, los métodos observados durante la maduración de la semilla para resistir la desecación y el daño térmico se han adaptado de manera similar para proteger sensibles moléculas biológicas, mediante la mezcla de ciertos compuestos biológicos con azúcares y otros compuestos (o sus equivalentes funcionales, por ejemplo, las proteínas histonas) implicados en la protección de la integridad de las semillas antes de la desecación (por ejemplo, por liofilización). El producto resultante es un sólido altamente estable y seco. Ahora se ha encontrado que es posible adaptar los mecanismos de protección que ofrece a las semillas y el

polen durante los períodos de desecación con el propósito de preservar moléculas sensible al calor o la desecación, especialmente componentes biológicos (por ejemplo, partículas de virus) durante variaciones en las condiciones de almacenamiento” (Drew 2008: 1-2).

En esta solicitud de patente se citan trabajos de los científicos más prominentes en el tema de la criptobiosis, la hidrobiosis en tardígrados (Crowe, Clegg) y en semillas (A. C. Leopold), reconociendo la fuente de la aplicación en la investigación básica y los intentos de aplicación a la conservación de muestras orgánicas por parte de estos y otros autores. Igualmente, el anuncio de que la tecnología desarrollada por Stabilitech consigue superar la dependencia que la industria de las vacunas tiene de la “cadena de frío”, del uso de congeladores para la preservación, transporte y almacenamiento de muestras biológicas, fue hecho en la publicación científica *Vaccine*, resaltando el hecho de que tiene la capacidad de conservar muestras biológicas durante semanas o meses a temperaturas de 37 grados centígrados, con el empleo de equipos estándar y excipientes baratos (Stewart et al. 2014). En el caso de la tecnología de preservación desarrollada por Stabilitech, puede observarse que las lecciones aprendidas del estudio científico han sido aprovechadas en las tres modalidades de aprendizaje desde el capital natural. Bioinspiración, pues el conocimiento de las capacidades de suspensión metabólica en organismos vivos ha sido la fuente de ideas inicial, dando paso a la tarea de replicación de los procesos naturales (el método consiste en la combinación de tres elementos; un componente biológico (enzima, vacuna, glóbulo, virus, etc.), una proteína (LEA o histona 2A) y un azúcar (Trehalosa, sucrosa, rafinosa, etc.). Incluso, la trayectoria de la tecnología de almacenamiento y conservación a temperatura ambiente ha aplicado la Bioutilización, en la medida en que algunos componentes importantes para la preservación provienen de la naturaleza; tal es el caso de la histona 2A, una hormona del estrés, que proviene de la *Artemia Franciscana* (Crowe et al. 2005). El desarrollo de esta tecnología permitió a la compañía Stabilitech contar con financiación por un valor de 7.5 millones de Libras, así como ganar un contrato con una división del departamento de defensa de los Estados Unidos de Norteamérica por un valor de 4 millones de dólares (Sachs Associates 2011).

Los Tardígrados: Una fuente de innovación para superar la dependencia de la cadena de frío en la industria de la bio - preservación.

Los dos tipos de aprendizaje desde el capital natural que son característicos de la tecnología de preservación de muestras biológicas desarrollada por la compañía Biomatrix se relacionan con el conocimiento alcanzado sobre las capacidades de los tardígrados para suspender por largo tiempo sus funciones metabólicas y recuperarlas posteriormente mediante la rehidratación. El origen bioinspirado de esta tecnología se relaciona con un hecho fortuito; la visita de los creadores de la tecnología “SimpleMatrix”- el Dr. Rolf Müller y la Dra. Judy Müller Cohn- a una tienda de juguetes:

“Era simplemente increíble, aquí estaba yo gastando todo este dinero para almacenar mis muestras en congeladores a -80°C de temperatura, y veo a los Monos Marinos [Artemia salinas] simplemente colgados del estante todos secos” (Blow 2009: 175).

El encuentro con la Artemia Franciscana, y su capacidad para permanecer desecada y posteriormente recuperar sus funciones vitales, se constituyeron en una especie de momento “Eureka” para los fundadores de Biomatrica, quienes empezaron a cuestionarse la idea de que la preservación de organismos vivos o muestras biológicas requiriese congelamiento a muy altas temperaturas.

En una revisión de las tecnologías que permiten mantener la integridad y la calidad de muestras biológicas que deben ser preservadas, almacenadas, transportadas y posteriormente manipuladas a temperatura ambiente, los creadores de esta tecnología, hablan del nuevo paradigma que está permitiendo superar la dependencia de congelamiento de las muestras biológicas a temperaturas que oscilan entre los -20°C y los -80°C , resaltando la aproximación biomimética basada en el conocimiento del proceso de anhidrobiosis de los tardígrados:

“Un nuevo enfoque basado en la imitación de los procesos biológicos naturales de la preservación de ADN ha conducido al desarrollo de novedosas formulaciones sintéticas que ofrecen mejores opciones de estabilización, almacenamiento y envío para una amplia gama de ácidos nucleicos. Se imita el proceso de bioestabilidad natural de los organismos extremófilos en cuanto a la conservación de sus tejidos y células en un estado seco durante más de 100 años y ser capaces de reanudar su función normal después de la hidratación...En una serie de estudios que demuestran esta capacidad en los organismos naturales, equipos separados dirigidos por Clegg y Crowe describen la trehalosa, un compuesto a base de azúcar, como protector importante contra la degradación de la estructura de doble hélice del ADN...el principio de anhidrobiosis ahora ha sido aplicado para desarrollar reactivos comerciales para la estabilización, conservación y envío de ácidos nucleicos a temperatura ambiente” (Clement et al. 2010).

La tecnología llevada al mercado por esta empresa consiste en un dispositivo (denominado matriz) el cual contiene una muestra biológica, un estabilizador primario (la trehalosa), un estabilizador secundario (la trehalasa, una enzima que cataliza a la trehalosa) y un solvente (Muller-Cohn y Muller 2009: 2).

Las evaluaciones externas muestran la efectividad de SampleMatrix frente a los métodos de congelamiento de muestras tanto a -20°C , como a -80°C , al igual que su buen desempeño frente a las tecnologías rivales en el mercado (Somiari et al. 2011).

Desde el punto de vista de su proyección en el mercado del llamado “biobanking”, la compañía Biomátrica estableció una alianza con la compañía Qiagen, una multinacional holandesa, líder en el mercado mundial de tecnologías para el diagnóstico molecular, para lanzar al mercado global su tecnología SampleMatrix, con la denominación de “QIAsafe”.

La tecnología de biomátrica puede ser considerada como un intento exitoso de transferencia de los principios de funcionamiento de la anhidrobiosis hacia un contexto sintético en el que se consigue, mediante combinación de componentes químicos, la creación de una barrera protectora termoestable para las muestras biológicas que pueden ser recuperadas con una rehidratación simple.

8.9. Los corales como fuente de inspiración.

Usando la misma fuente de inspiración, la forma en que la que se construyen los arrecifes de coral, el Dr. Brent Constantz⁶⁴ desarrolló dos tecnologías: cemento nanocristalino para reparar fracturas en huesos y un proceso de fabricación de cemento a partir del gas de combustión y el agua de mar. Con respecto al primer producto, el profesor Constantz es uno de los pioneros en la creación de cementos para reparar fracturas en huesos que son inspirados en la naturaleza. La idea de crear un cemento para reparar los huesos humanos surgió durante una visita familiar. Así lo expresa el Dr. Constantz, en una entrevista al magazine Greening of Oil⁶⁵:

“Estaba trabajando unos 400 kilómetros al noreste de Tahití, pero antes de ir, visité a mis padres. Mi padre es un médico. Yo encontré una de sus revistas médicas y leí un artículo sobre la osteoporosis. [La revista] Decía que la osteoporosis era el gasto médico No. 1 en los Estados Unidos y esto realmente me llamó la atención. Yo estaba estudiando qué tan rápido los corales crecen y como una bombilla, me di cuenta de que podíamos imitar la forma en que crece el coral en la naturaleza”.

A partir de ese momento, los estudios del Dr. Constantz se enfocaron en entender cómo los esqueletos de los corales producen los arrecifes, y cómo se puede, de alguna manera, replicar este tipo de crecimiento mineral en los huesos humanos. Del desarrollo de estas investigaciones, el Dr. Constantz obtuvo múltiples patentes con aplicaciones médicas, entre

⁶⁴ Brent Constantz es un biólogo marino y geólogo de la Universidad de California. Actualmente es una autoridad en el tema de biomineralización (siendo profesor de la Universidad de Stanford) y es miembro activo de las sociedades americanas y europeas de investigación Ortopédica, de la junta directiva del Instituto de Ciencia Molecular Ambiental Stanford, de las sociedades americanas y europeas de biomateriales y la Sociedad de Investigación de Materiales.

⁶⁵ Véase <http://www.agiweb.org/workforce/profiles/bios/brcbio.html>

las cuales se destacan: Minerales in situ de fosfato de calcio - método y la composición (Constantz et al. 1994), Cementos ortopédicos que comprenden un agente de contraste de bario (Constantz et al. 2005), Cementos de fosfato de calcio que comprenden hueso autólogo (Constantz 2008), Cementos de fosfato de calcio que comprenden un agente osteoclastogénico (Constantz y Delaney 2007), Cementos de fosfato de calcio y métodos para el uso de los mismo (Constantz et al. 2013), recubrimientos de prótesis de hidroxiapatita (Constantz y Osaka 1992), Métodos y dispositivos para la preparación, almacenamiento y administración de los cementos de fosfato de calcio (Constantz y Clawson 2000).

En 1987, el Dr. Constantz crea la compañía Norian, la cual lleva el nombre de la etapa geológica en la que aparecieron por primera vez modernos corales formadores de arrecifes, hace aproximadamente 200 millones de años. Después de muchos años de investigación, Norian produce Norian SRS (sistema de reparación del esqueleto) un cemento de secado rápido que se introduce en el hueso fracturado quirúrgicamente por inyección. En la patente US 4880610 de Constantz (1989) describe el método y composición de los minerales de fosfato de calcio in situo (formación del cemento sintético). De igual manera, en la revista Science se reporta el descubrimiento científico:

“Un proceso ha sido desarrollado para la formación in situ de la fase mineral del hueso. Las fuentes de calcio y fosfato inorgánico se combinan para formar una pasta que se implanta quirúrgicamente por inyección. Bajo condiciones fisiológicas, el material se endurece en minutos termina con la formación de carbonatohidroxiapatito. Después de 12 horas, la formación carbonato-hidroxiapatito estaba casi completa...La composición y la morfología cristalina de carbonatohidroxiapatito formado son similares a las del hueso. Los estudios en animales proporcionan evidencia de que el material se remodela en vivo. Un nuevo enfoque para la reparación esquelética está siendo probado en ensayos en humanos para diversas aplicaciones; en uno de los ensayos del nuevo biomaterial está siendo colocado por vía percutánea en fracturas agudas. Después de endurecimiento, sirve como fijación interna para mantener la alineación adecuada, mientras se produce la curación”. (Constantz et al. 1995).

La compañía Norian recibe en el año 1998 la autorización de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) para comercializar Norian SRS en fracturas de brazos y cráneo (Greco et al. 2005:469). En el año 1999, la compañía Norian fue adquirida por la multinacional de dispositivos médicos Synthes Holding AG de Suiza, líder del mercado de manejo de fracturas óseas, con el propósito de usar el cemento sintético (Norian) para expandir su oferta de sustitutos biológicos de los huesos.

En el año 2002, Constantz y algunos miembros del antiguo equipo Norian, siguieron haciendo mejoras al producto inicial para que el cemento fuera más fácilmente inyectable

(menos viscoso) pero sin comprometer el tiempo de fraguado y su resistencia. Nuevamente, la inspiración vino de la naturaleza, una característica geológica marina llamada el lodo anóxico, generaba un material mineral compuesto de calcio y fosfato que en combinación con la sílice podrían causar el efecto que se requería (McKeag 2013:20).

El equipo fue capaz de integrar esta química en la fórmula para el cemento, y esto sirvió de base para una nueva empresa, Skeletal Kinetics LLC, la cual desarrolla, fabrica y comercializa SKaffold, un hueso de fosfato de calcio diseñado para ser usado en regiones de hueso esponjoso (especialmente en los extremos de huesos largos por debajo de las superficies articulares, como en la muñeca, la cadera y la rodilla). El material es biocompatible y remodela a través de procesos mediados por células de una manera dirigida. En agosto del año 2006, Skeletal Kinetics LLC pasó a formar parte del grupo médico mundial Colson Associates, Inc.

También, una vez Norian fue vendida, el profesor Constanz regresó a la Universidad de Stanford. Junto con colegas de la Universidad, entre ellos el Dr. Tom Fogarty (inventor del catéter embolectómico) formaron una nueva empresa, denominada Corazon Technologies, Inc; la cual se creó para abordar el problema de la calcificación patológica en el sistema cardiovascular (ibídem). Corazon Technologies, Inc. desarrolló un proceso en el que se inyecta ácido suave en los vasos vasculares con el fin de disolver y expulsar la calcificación infractor.

Por otra parte entre 2002 y 2004, a pesar de las advertencias de la FDA de la no aprobación de usar Norian en cirugías de columna vertebral, porque los estudios de investigación habían arrojado que causaba coágulos de sangre potencialmente fatales; la empresa Synthes decidió probar Norian en pacientes. El resultado fue desastroso, por lo menos cinco pacientes a los que se les habían inyectado Norian en su espina dorsal murieron en el quirófano. En el 2009, el Departamento de Justicia de los Estados Unidos imputó, cargos a 4 ejecutivos de Synthes por: ensayos clínicos no autorizados, promoción de productos para usos no aprobados y además por no informar a los pacientes sobre los posibles riesgos a los que se exponían y por ocultar que el cemento no estaba aprobado⁶⁶.

En el año 2011, la empresa Kensey Nash Corporation y Synthes logran un acuerdo de largo plazo para el suministro del cemento de huesos, en el cual Kensey Nash fabricará productos Norian SRS y Synthes distribuirá en exclusiva los productos en todo el mundo. Actualmente, la invención médica es usada en la mayoría de salas de operaciones que realizan cirugía ortopédica en brazo y cráneo.

La FDA ha aprobado varios cementos restauradores de huesos para uso clínico, algunos ejemplos se presentan en la tabla 11.

⁶⁶ Véase <http://features.blogs.fortune.cnn.com/tag/hansjorg-wyss/>

Tabla 11. Cementos de ortofosfato de calcio aprobadas por la FDA.

PRODUCTO	FABRICANTE	APLICACIÓN
BoneSourceTM	Striker Howmedica Osteonics (Rutherford, NJ)	Cráneo facial
α – Bone Substitute Material (α – BSM)	Etex Corporation (Cambridge, MA)	Relleno de huesos defectuosos y huecos, dental, Fracturas del radio distal esqueléticas craneofaciales
Skeletal Repair Systems (SRS)	Norian Corporation (Cupertino, CA)	Fracturas del radio distal esqueléticas craneofaciales

Fuente: Dorozhkin (2009:229)

La otra invención consiste en un proceso de fabricación de cemento a partir del gas de combustión y el agua de mar, de manera análoga al proceso por el que los arrecifes de coral se forman a partir de dióxido de carbono y los minerales en el agua del océano. Basado en esta idea, el profesor Constantz crea la empresa biotecnológica Calera en 2007. Al año siguiente, los inventores Cecily Ryan, Laurence Clodic junto con Constantz, sustentan el método de Cementos hidráulicos con composiciones compuestas de carbonato en la patente de Constantz et al. (2010).

El proceso de Calera recibe el nombre de mineralización vía precipitación acuosa (siglas en inglés MAP). Un avance importante de esta invención es que en la producción de cemento se emite grandes cantidades de dióxido de carbono, en contraste, Calera en sus operaciones secuestra dióxido de carbono de los gases de combustión, en particular de centrales eléctricas de carbón, por lo que sería un proceso inverso, es decir, produciendo materiales de construcción con emisiones de carbono negativas. Calera produce cementos, piedra caliza sintética, que puede sustituir a los materiales de construcción. Los productos de Calera incluyen adoquines, hormigón y otros materiales de construcción, y representan una forma de dióxido de carbono secuestrado (ACEEE 2011:178).

El método de producción de cemento sintético consiste en la interacción entre CO₂ y el agua. Cuando el CO₂ se disuelve en el agua (a bajas temperaturas), resulta otra molécula el carbonato o CO₃. Cuanto mayor sea la concentración de CO₂, más carbonato se forma, como los gases de combustión de una planta de energía. Simultáneamente, el agua de mar contiene calcio, cuando el carbonato se mezcla con el calcio, forma carbonato de calcio, material sólido, piedra caliza, así es como forman los corales sus conchas. De igual forma, el Dr. Constantz argumenta que el procedimiento de fabricación de cemento es un ejemplo de biomimética porque busca imitar la capacidad de calcificación de los corales al

construir los arrecifes, por medio de la captura de toneladas de CO₂ de la atmósfera a través del océano, creando estructuras como la Gran Barrera de Coral en Australia⁶⁷.

Desde el punto de vista de la biomimética, existen análisis del campo de los cementos que muestran los desarrollos contemporáneos del tema en los que se relacionan la biomineralización, el desarrollo de materiales y procesos que representan y/o aplican la biomimética. Deshpande et al. (2013:83-85) plantean que el concepto de eco-cemento que usa la compañía Calera se basa en la imitación del proceso por el cual los organismos marinos hacen arrecifes y conchas utilizando iones de CO₂ y calcio disueltos en el agua del mar para formar carbonatos a temperaturas y presiones normales; para desarrollar prácticas industriales de producir carbonato de calcio de las emisiones de carbono y el agua de mar para después ser puesto a altas temperaturas y ser procesado para formar silicato de calcio, que es un ingrediente principal en cemento Portland ordinario. Por su parte, McKeag (2013: 22) plantea varios aspectos que se involucran en la tecnología de Calera, aquí se destacan que en primer lugar el conocimiento del proceso de mineralización en la naturaleza jugó un papel determinante en el desarrollo del proceso de Calera, en especial del conocimiento que proviene del estudio exhaustivo de los corales. En segundo lugar, poder traducir los procesos naturales hacia las aplicaciones técnicas en la industria, en cuanto a la imitación de la química de la naturaleza.

Por último, no se puede desconocer que existe un debate alrededor del proceso que usa la Calera. Algunos científicos críticos han planteado sus preocupaciones, por ejemplo Ken Caldeira, científico del clima en el Instituto Carnegie de Washington, en la Universidad de Stanford, en un correo a compañía Calera señaló⁶⁸:

“Hago un llamado a la Academia de Ciencias de California para retirar la exposición de Calera hasta el momento en que Calera demuestre (i) que su proceso no elimina los cationes del océano de una manera que en última instancia conduzca el flujo de CO₂ desde el océano a la atmósfera superando la cantidad de combustible fósil almacenado en el mineral de carbonato y (ii) que su proceso no acidifica el océano”.

8.10. La Superposición de los Procesos de aprendizaje desde el capital natural y la alambrada.

Este invento tiene la peculiaridad de que nos muestra una trayectoria por los distintos procesos de aprendizaje natural: bioutilización, bioinspiración y biomimética. En este caso,

⁶⁷ Véase la entrevista con Brent Constantz <http://earthsky.org/human-world/brent-constantz-builds-cement-like-coral-do>

⁶⁸ Véase <http://www.businessweek.com/stories/2009-03-25/climate-change-hot-debate-over-green-concrete>

los agricultores utilizaron especies vivas de algunas plantas como alambrada natural contra el peligro que representaban amenazas externas a los cultivos como el ganado libre para la expansión agrícola:

“Una de las alternativas de más éxito, bien conocida en Europa pero no utilizada desde entonces en Norteamérica, era la fila de seto. En una región en la que el ganado libre amenazaba los pastos, la efectividad de las filas de seto aumentaba cuando se utilizaban para formarlas plantas con espinos. Se plantaban zarzas, cactus, rosas y falsas acacias, pero el naranjo Osage parecía ser la mejor planta para fines de cercado” (Basalla 1991:75).

En esta primera etapa, los humanos aplican el proceso de bioutilización porque usan un componente natural (las plantas) con el propósito de integrarlo de manera funcional en una actividad humana (la agricultura). Sin embargo, estos cercos naturales presentaban inconvenientes:

“Tenían un lento desarrollo, no podían ser movidos fácilmente, proyectaban sombra a los pasos adyacentes, usurpaban un valioso espacio de plantación y constituían un refugio para malas hierbas, parásitos e insectos” (ibídem: 76).

Los desarrollos posteriores, muestran que se usó alambre liso pero con escaso obstáculo para el ganado (Basalla 1991:76). En esta segunda etapa, los seres humanos buscaron desarrollar tecnologías que cumplieran la misma función de las plantas, es decir que actuaran como protección de los campos agrícolas contra los animales herbívoros, lo cual podría identificarse como una aplicación del proceso de bioinspiración pero sin que necesariamente se replicara la forma de las espinas.

Entonces fue a partir en el año de 1868 donde Michael Kelly mejoró la cerca de alambre inspirada en la naturaleza de “el seto de espino”, así lo plantea en la patente No.74379:

“Mi invención se refiere a otorgarle al cerco de alambre un carácter aproximado de seto de espino. Yo prefiero designar el cerco así producido como cerco espinoso (thornyfence)” (Kelly 1868:2).

Cabe notar que todas las plantas usadas como cercos naturales dentro de su morfología presentan espinas. La funcionalidad de las espinas ha sido documentada en diversos estudios. El argumento más común de las espinas es ser un mecanismo de defensa para disuadir a los animales herbívoros de comer sus tejidos (Grubb 1992, Cooper y Ginnett 1998 y Young y Okello 1998; entre otros). Por tanto, el invento de la alambrada de Kelly podría identificarse con una tercera etapa, donde la tecnología alcanza el aprendizaje biomimético, porque precisamente copia la forma y la función de las espinas en las plantas como respuesta natural al problema de depredadores herbívoros. De esta manera,

se impide el paso de los herbívoros que amenazan con invadir los cultivos de los agricultores.

El análisis de la patente refuerza la idea de que el diseño de la alambrada, en términos de su forma y función, ha sido transferido desde especies naturales (Naranjo Osage) hacia una tecnología desarrollada por los humanos que emplean materiales diferentes a los aplicados a la tecnología natural (metal en vez de tejido vegetal) ampliando el propósito o los fines para los cuales es susceptible de ser utilizado; de tal forma que los usos de la alambrada adaptada por los humanos son múltiples y no se limitan a la función de defensa frente a depredadores.

Por otra parte, algunos analistas han planteado el gran impacto económico que ha tenido este invento; por ejemplo Hornbeck (2009) plantea que a partir de su invención y con el uso intensivo de la alambrada, el desarrollo de la agricultura en Estados Unidos aumentó entre 1880-1900. El autor plantea que esto se debe a que los agricultores tenían una mayor capacidad de proteger sus cultivos de la invasión, es decir que, se experimentó una disminución del riesgo de sufrir daños por la aparición de ganados no compensados por parte otros; lo cual representa para los agricultores incrementos en la producción, mejora del suelo, aumento en el valor de la tierra y aumento en la productividad.

CAPÍTULO IX

La Bioutilización Una Forma de Aprendizaje Desde El Capital Natural Basado En La
Incorporación De Procesos y Componentes Naturales.

9. La Bioutilización Una Forma de Aprendizaje Desde El Capital Natural Basado En La Incorporación De Procesos y Componentes Naturales.

La bioutilización consiste en el uso de un componente natural con el propósito de integrarlo de manera funcional en una tecnología, bien o servicio desarrollado por los humanos. Dicho componente natural puede consistir en una molécula (Acuaporin), una sustancia (Estatinas, Taxol, Byetta y, Medicamentos biomarinos), un organismo o población (Mushroom, Biodome), o una función ecosistémica (Polinización y Control biológico de plagas), entre otros. Igualmente, el proceso de integración de los diversos componentes naturales puede ocurrir a diferentes escalas (nivel molecular, nivel celular, a nivel del organismo o a nivel de los ecosistemas, por ejemplo).

Desde el punto de vista del proceso productivo, el componente natural es susceptible de ser incorporado en diferentes etapas del proceso económico de agregación de valor: unas veces es empleado como un insumo intangible, que no es directamente observable por parte del consumidor del bien final; tal es el caso de los productos alimenticios cuya calidad y cantidad dependen de los servicios ecosistémicos de control de plagas y/o polinización. Otras veces, el componente natural es modificado en su forma y/o función y es transformado en un bien de consumo final, por ejemplo en casos como el del producto para embalaje Mushroom, en el cual se modifica y se limita el crecimiento del micelio del hongo (*Fusarium* y *Aspergillus*), dándole forma y densidad compacta para generar un material con funciones similares o análogas a las de ciertos polímeros sintéticos (tales como la espuma de poliestireno “Styrofoam”).

El concepto de bioutilización que se intenta exponer de manera general a su vez está compuesto por muchas modalidades de aprovechamiento que han sido identificadas y denominadas de manera específica en el seno de diversas disciplinas (Ingeniería, Biología, Ecología, Química, Biomecánica, entre otras), para las cuales es difícil establecer una delimitación clara y definitiva porque tienen entre ellas se consideran elementos comunes. Algunos autores han sugerido que estas denominaciones constituyen aproximaciones a una misma realidad sustantiva, razón por la cual sugieren evitar esta dispersión de conceptos que constituyen variaciones de un mismo objeto (Swiegers 2012:5).

9.1. Nuevos materiales de embalaje industrial mediante la utilización de hongos: Mushroom®

Mushroom es un material de embalaje producido por la empresa Ecovative Design en Green Island, Nueva York-Estados Unidos. Este material se obtiene por medio del cultivo del micelio –el cuerpo vegetativo de los hongos-, cuya función es absorber nutrientes de los residuos orgánicos, tales como: semillas de algodón, fibras de madera, cáscaras de

maíz, para alimentar al hongo, que están a temperatura ambiente y en oscuridad. El crecimiento del hongo se produce dentro de 5 a 7 días en una estructura de plástico moldeada que los productores personalizan para cada aplicación. Luego, cada pieza es sometida a un tratamiento térmico que detiene el crecimiento del hongo. Es decir, el producto final se obtiene mediante un proceso de producción realizado fundamentalmente por el micelio del hongo, en el que el insumo está dado por los residuos orgánicos que sirven de alimento al micelio y el aporte humano consiste en la invención de un método para manipular el proceso natural dándole las características deseables para el consumo final en el mercado (un material orgánico, biodegradable, denso, resistente, capaz de sustituir a sus análogos sintéticos).

En la patente de Bayer y McIntyre (2011) denominada “Método para la producción de un material de quitina rápidamente renovable utilizando filamentos de hongos y productos hechos de esta manera” (Method for producing rapidly renewable chitinous material using fungal fruiting bodies and products made thereby) se explica el método para el cultivo y crecimiento del micelio de los hongos, empleando residuos orgánicos, de los cuales absorbe nutrientes. Estos elementos se combinan con el micelio (pegante natural autoadhesivo) en moldes plásticos donde crece, se pega de manera compacta y le da forma final al material. Los inventores Gavin McIntyre y Eben Bayer señalan que, en general, se cultiva el hongo *Basidiomycete*.

Hummels (2012) realiza un análisis de Mushroom, en el cual explica que el método usado por Ecovative Designe consiste en, ajustar y comprimir el hongo y conferirle la densidad necesaria para que sea utilizado como material de empaque, obteniendo una forma rígida. Por tanto, es de resaltar que en realidad, la empresa Ecovative no fabrica materiales, lo que desarrolla es un método para cultivar hongos que produzcan micelio.

Por otra parte, los inventores de Mushroom también contribuyen a la discusión sobre la noción de biomimética⁶⁹:

“Biomimetismo se define como la innovación inspirada por la naturaleza. La mayoría de las historias de éxito biomimetismo se refieren a aumentos en la eficiencia, o disminuciones en el uso de materiales, las cuales de seguro son cosas buenas. Sin embargo, yo diría que la biomimética a menudo debería definirse como soluciones naturales que tratan de copiar la naturaleza”.

Siguiendo con esta idea, los innovadores de Ecovative consideran que los productos o tecnologías desarrolladas biomiméticos aunque se producen de manera más eficiente no

⁶⁹ Véase <http://hellomaterialsblog.ddc.dk/2012/03/29/bio-adaptation-of-fungi-to-grow-materials/>

son sostenibles. En este argumento radica la diferenciación que existe, según los inventores, entre su producto y uno biomimético⁷⁰:

“Lo que estamos haciendo en Ecovative no es la biomimética. Es bio-adaptación. Bio-adaptación se trata de alinear el propósito fundamental de un organismo para satisfacer una necesidad real de las personas en este planeta. La agricultura es bio-adaptación. Ecovative es el aprovechamiento de micelio para hacer lo que ha evolucionado durante millones de años...”.

Sin embargo, el instituto Ask Nature (Biomimicry) tienen una opinión diferente sobre el material Mushroom^{®71}:

“Mientras que el uso de hongos para crear la resina es bioutilización, este proceso es biomimética en el sentido de que imita los flujos de materiales cíclicos de la naturaleza. Los inventores observaron que la función de las resinas industriales podría resolverse utilizando las resinas abundantes y benignos de los hongos, y luego encontraron una especie de hongo adecuados”.

Ahora bien, para dar una clasificación propia se debe considerar la definición de bioutilización que se ha sugerido anteriormente. El material Mushroom[®] puede ser identificado con este tipo de aprendizaje de la naturaleza porque hace uso de componentes biológicos (insumos como: residuos orgánicos y el organismo productor, el hongo) en un ambiente controlado (extrusión del material, proceso de prensado y moldeado) y manipulando la función biológica de absorber los nutrientes llevada a cabo por el micelio de los hongos. Es decir, el material Mushroom[®] no consiste en la copiar o emular la estrategia o la función del micelio en el hongo (biomimética) sino en la incorporación de un productor natural y las propiedades del material resultante de la estrategia de absorción de nutrientes, la cual difiere sustancialmente de la forma y la función que originalmente tiene este componente natural en su hábitat o ecosistema natural. Por lo tanto, se coincide con los inventores del producto aunque no por las mismas razones.

Por otro lado, en la naturaleza, los hongos tiene la capacidad de capturar nutrientes de diversas fuentes de recursos favoreciendo su rápido crecimiento y producción de sustancias con características de dureza y resistencia. Los hongos tienen una pared celular que se extiende constantemente en el ápice de las hifas. Estas estructuras de la pared celular de los hongos se basan principalmente en la quitina y el beta glucano⁷². La quitina

⁷⁰ Ibídem.

⁷¹ Véase <http://www.asknature.org/product/a10b75e63cdad605b63a71bbba2caa15>

⁷² Véase http://campus.fca.uncu.edu.ar:8010/pluginfile.php/12409/mod_folder/content/0/Apuntes%20de%20Micol

es una sustancia dura y fuerte que ya se utiliza en múltiples industrias como una sustancia en aditivos alimentarios para la estabilización, aglutinantes en telas y adhesivos, hilo quirúrgico, aplicaciones medicinales, entre otras (Mármol et al. 2011). Los creadores de Mushroom identificaron estas propiedades como deseables de su producto en la medida en que, además de ser un compuesto biodegradable que se expande, duro y resistente; adopta la forma del recipiente que lo contiene de manera compacta por pegante producido por el Micelio, requiriendo poco consumo de energía, de manera más eficiente y rentable que otros procesos de crecimiento sintéticos.

A nivel de mercado, los productos que contienen Mushroom poseen varias ventajas competitivas de Ecovative frente a sus competidores directos, las empresas fabricantes de plásticos. En primer lugar, la producción de Mushroom es más rentable que la producción de plásticos sintéticos, debido a que éstos últimos, requieren de insumos derivados de hidrocarburos que son más costosos. En segundo lugar, Ecovative en asocio con la empresa Sealed Air Corporation SAC (el mayor operador de embalaje en Estados Unidos) fortaleció la producción industrial de la tecnología Mushroom y la distribución de los distintos productos de Ecovative a escala comercial (Hummels 2012:106-107). Por último, los plásticos dada su composición tóxica (petroquímicos) al fabricarse contaminan el medio ambiente y una vez utilizados es difícil reciclarlos, en contraste los productos de embalaje que usan como material Mushroom por ser biodegradables apoyan las leyes medio ambientales que comprometen a las industrias con el desarrollo y el uso de mejores materiales que favorezcan al medio ambiente.

Actualmente, Ecovative está logrando incursionar en algunas industrias como: Embalaje, Automotriz, Construcción, Mobiliario, Implementos deportivos entre otras. Además es relevante señalar algunas aplicaciones de productos con Mushroom⁷³. La empresa de la industria electrónica Dell trabajó con el equipo de diseño de embalaje de Ecovative para reemplazar piezas de espuma de polietileno fabricados EPE que proporciona protección a los discos duros de sus servidores. Otra empresa que usa los productos Ecovative es Crate & Barrel en Estados Unidos, quienes buscando eliminar la espuma de plástico para los embalajes de sus artículos y accesorios de muebles para el hogar, probaron incorporando bloques hechos de Mushroom® para empaquetar las estanterías de acero, logrando resultados satisfactorios tanto para la empresa como para sus clientes. De igual modo, en la industria de implementos deportivos la compañía PUMA está utilizando Mushroom® como embalaje para proteger su edición limitada PUMA Laird stand-up paddle (SUP), una vez llega a su destino, el empaque se rompe o puede ser usada como abono orgánico. Por último, el laboratorio de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) usará el material Mushroom para proteger el sistema DART-ETD en los equipos de comunicación de un barco en las condiciones humedad, interperie y salinidad del océano.

[og%C3%ADa%20Morfolog%C3%ADa%20y%20Clasificaci%C3%B3n%20Biodiversidad%20I.pdf?forcedownload=1.](http://www.ecovative.com/2012/01/20/mushroom-the-future-of-packaging/)

⁷³ Véase <http://www.ecovative.com/>

9.2. Hongos, estatinas y bioutilización al servicio del control del colesterol

Las estatinas son fármacos que reducen los niveles elevados de colesterol circulante que unido a las lipoproteínas de baja densidad (LDL) originan enfermedades cardiovasculares. El colesterol circulante se origina de dos formas, por una parte mediante la activación de una vía sintética de esteroides, en la cual una reductasa cataliza la formación de mevalonato a partir de 3-hidroxi-3- metilglutaril coenzima A (HMG-CoA). Por otra parte, se origina mediante los alimentos. Para eliminar el colesterol del organismo se requiere de un emulsificador (apolipoproteína) que circula en la sangre. Sin embargo, existen diferentes lipoproteínas, las de “baja densidad” (LDL) se encarga del acarreo del colesterol hacia los tejidos; cuando la concentración del colesterol unido a LDL se eleva, genera enfermedades cardiovasculares. Y las lipoproteínas de “alta densidad” (HDL) conducen el colesterol total al hígado para su eliminación, evitando así su acumulación en la pared vascular (Zárate et al. 2009).

Las estatinas por tener una estructura similar a la enzima HMG-CoA reductasa, se unen de manera reversible al sitio activo de la enzima a concentraciones nanomolares, desplazando de manera efectiva el sustrato natural, la HMG-CoA, que se une a concentraciones micromolares. De acuerdo con Badimon (2011:1), las estatinas al reducir la síntesis de colesterol de las lipoproteínas de baja densidad (LDL), promueven una regulación positiva de los receptores de las LDL en las membranas del hepatocito, lo que deriva en una disminución del LDL entre un 30 y un 40%, un aumento del colesterol de las lipoproteínas de alta densidad (HDL) entre un 5 y un 10% y una reducción de los triglicéridos (TG) de aproximadamente el 10%.

A mediados de los años sesenta, el bioquímico japonés Akira Endo de la Universidad de Tohoku interesado en los análisis sobre la biosíntesis del colesterol de Konrad Bloch, ganador del Premio Nobel en 1964, se dedicó al estudio de la bioquímica del colesterol y otros lípidos. Comenzó en 1966 su investigación sobre la HMG-CoA reductasa, una enzima controladora de la velocidad en la síntesis de colesterol, en el Departamento de Biología Molecular en el Colegio Albert Einstein de Medicina (AECM), en Estados Unidos. Después de regreso en Japón, en el año 1971, en los laboratorios Sankyo, el Dr. Endo creó una unidad de investigación para aislar compuestos, basándose en los hongos y setas (Endo 2004:2).

En 1976, aisló el hongo *Penicillium citrinum* la primera estatina, denominada mevastatina, la cual fue probada como inhibidor del colesterol en pruebas realizadas en animales. Las pruebas clínicas en humanos iniciaron en el Japón en el 1978. Posteriormente, en el año 1979, el Dr. Endo aisló 3 compuestos análogos a la mevastatina: monacolin J, monacolin K, monacolin L—, provenientes del hongo *Monascus ruber*. Según lo plantea Endo (2004:4) de estos tres compuestos, la monacolina K, fue ligeramente más eficaz en la inhibición de la HMG-CoA reductasa que mevastatina.

Los científicos de la empresa farmacéutica Merck, Alfred Alberts y Julie Chen, en el año de 1978, descubrieron la mevinolina aislada del hongo *Aspergillus terreus*. La mevinolina (comúnmente conocida como lovastatina) fue patentada en el año 1979 por Merck, sin embargo después de algunas pruebas se concluyó que la mevinolina era igual a la monacolina k. Lo cual produjo ciertos problemas de derechos autor, porque a pesar de que la mevinolina se había descubierto primero, la monacolina k se había patentado antes. Lo cual implicó que en Estados Unidos y varios países se aprobara la mevinolina frente a la monacolina k porque es prioridad en estos países quien realiza primero el descubrimiento.

En 1980, Merck comenzó los estudios clínicos de la lovastatina. Posteriormente, Sankyo suspendió los ensayos clínicos de mevastatina, que había sido llevado a cabo desde 1978, debido a tumores intestinales encontrados en los perros de prueba. De igual forma, Merck discontinuó los estudios clínicos de lovastatina y realizó más farmacológico y estudios toxicológicos. Sin embargo, en 1982, varios médicos, comenzaron a dar lovastatina a los pacientes con graves hipercolesterolemia que no respondían a los agentes disponibles. Estos ensayos mostraron que la lovastatina redujo drásticamente el colesterol en plasma, y muy pocos efectos secundarios fueron señalados (Endo 2004:3).

En el año 1986, Merck presentó una solicitud de nuevo fármaco para la lovastatina a la Administración de Alimentos y Medicamentos “Food and Drug Administration” (FDA) en Estados Unidos. El comité de la organización aprobó el fármaco para ciertos pacientes cuyos niveles de colesterol elevado no puede ser bajado con la dieta u otros métodos no farmacológicos. En 1987, la FDA anunció que había aprobado la lovastatina. El nombre comercial de lovastatina es Mevacor® (Endo 2004:7).

La mevastatina y la lovastatina impulsaron en años posteriores la creación de nuevas estatinas. Por ejemplo, la simvastatina producida mediante una alteración química del hongo *Aspergillus terreus*. Su nombre comercial es Zocor®. La pravastatina producida mediante alteración microbiana de compuestos del hongo *Nocardia autotrophica*. Su nombre comercial es Pravachol®. Por último, se produjeron compuestos sintéticos, tales como fluvastatina y atorvastatin, rosuvastatina y pitavastatina (Ver tabla 12).

Tabla 12. Estatinas, fármacos que ayudan a la reducción del colesterol.

ESTATINA	NOMBRE COMERCIAL	COMPAÑÍA	MÉTODO DE MANUFACTURA	PATENTE
Mevastatina	(No fue aprobado por sus efectos secundarios pero es base para la pravastatina)	Sankyo Company Limited	Fermentación-Hongo: <i>Penicillium citrinum</i>	US 4,049,495 A "Physiologically active substances and fermentative process for producing the same"
Lovastatina	Mevacor	Merck & Co	Fermentación-Hongo: <i>Aspergillus terreus</i>	US 4,231,938 A "Antilipemic agents; fungistats"
Simvastatina	Zocor [®]	Merck and Co	Fermentación-Hongo: <i>Aspergillus terreus</i>	US 4,444,784 "Antihypercholesterolemic compounds"
Pravastatina	Pravachol/Pravigard [®]	Bristol-Meyers Squibb, AndrX Pharma Inc	Fermentación-Hongo: <i>Nocardia autotrophica</i>	US4,346,227 A "In treatment of hypercholesteremia"
Fluvastatina	Lescol [®]	Novartis	Sintético	US 4,739,073 A "Intermediates in the synthesis of indole analogs of mevalonolactone and derivatives thereof"
Rosuvastatina	Crestor [®] .	AstraZeneca	Sintético	US 7396927 B2 "Process for preparation of rosuvastatin calcium"
Pitavastatina	Livalo	Eli Lilly-Kowa Company, Ltd	Sintético	US6465477 B1 "Stable pharmaceutical composition"
Atorvastatina	Lipitor [®]	Pfizer	Sintético	US 4,681,893 A "Trans-6-[2-(3- or 4-carboxamido-substituted pyrrol-1-yl)alkyl]-4-hydroxypyran-2-one inhibitors of cholesterol synthesis"

Fuente: Elaboración del autor

El aprendizaje natural que se asocia con las estatinas es la bioutilización, debido a que es un fármaco en el que el proceso de producción de las estatinas de primera generación aisló un componente natural de algunas especies de hongos. Si bien, de acuerdo con Chegwin et al. (2012), podría distinguirse entre dos grupos de estatinas: las naturales o generadas por procesos de fermentación conocidas como estatinas del tipo I y las sintéticas o del tipo II; es claro que los primeros compuestos tienen su origen natural en los hongos micromicetos pero además deben ser considerados el punto de partida para la investigación y producción de segundo grupo, las estatinas sintéticas. En este sentido, el aislamiento del compuesto activo representa la modalidad más pura de bioutilización a la cual quizás podrías denominar *bioutilización primaria* y el uso como fuente de conocimientos que permiten un proceso de aprendizaje y posterior desarrollo tecnológico que conlleva a la producción de compuestos semisintéticos o sintéticos con propiedades análogas a las del compuesto biológico, al cual se podría denominar como *bioutilización secundaria*.

La relación de las estatinas con el aprendizaje del tipo bioinspirado se basa en el trabajo investigativo acerca de la capacidad que tienen algunos microorganismos para bloquear la reductasa de HMG-CoA al respecto Zárate et al. (2009:173) plantean que el estudio sobre las estatinas se inició bajo esta hipótesis. Posteriormente, se cultivaron cerca de 5.000 especies de hongos hasta obtener y purificar una sustancia producida por el *Penicillium citrinum* (mevastatina). Para el caso de la producción de la lovastatina y la simvastatina, el compuesto extraído de las especies del género *Aspergillus terreus*, son frecuentemente empleadas para la producción a nivel industrial de las estatinas, con los mayores rendimientos asociados a cepas mutadas (Chegwin et al. 2012). De acuerdo con Jahromi et al. (2012), el sustrato extraído del hongo es capaz de producir 70 mg de lovastatina por kilogramo.

De esta manera, se puede evidenciar el rol fundamental que distintas especies de hongos han tenido en el proceso de investigación y producción de las estatinas. Incluso con la extracción de un compuesto del mismo hongo (*Aspergillus terreus*) se pueden obtener fármacos diferentes (simvastatina y lovastatina), lo que muestra diferentes formas de bioutilización. Investigaciones posteriores han encontrado otras fuentes naturales como promisorias de este tipo de compuestos (Gunde-Cimerman et al. 1993). De igual forma, se ha reportado la presencia de los compuestos ML-236B (Mevastatina, Compactina) y/o de Monacolina K (Mevinolina, Lovastatina) en el extracto de los cultivos sumergidos de más de ocho hongos diferentes (Chegwin et al. 2012:9).

En la dinámica de este mercado, según una publicación de Stagnitti (2008), las ventas de las estatinas entre 2000 a 2005 han duplicado las ventas por parte de pacientes ambulatorios con prescripción médica, pasando de \$ 7.7 mil millones a \$19.7 mil millones dólares. En ese mismo periodo, el número de personas que compraron estatina aumentó 88%, pasando de 15,8 millones a 29,7 millones de personas. Barrios y Miranda (2009) explican el enorme éxito en ventas de las estatinas. En 2006, dos estatinas entraron a la

lista de la revista Forbes de las 20 drogas más vendidas de los Estados Unidos, con US \$ 8.4 y US\$ 4.4 mil millones de dólares de ventas anuales (respectivamente), y el pronóstico es un aumento en el uso de las estatinas. En la actualidad, el liderazgo a nivel mundial lo representan las estatinas producción sintética, Lipitor y Crestor, las cuales estuvieron en el año 2012 en el top 20 de los fármacos más vendidos en el mundo. Según Chegwin et al. (2012) cerca de 25 millones de personas alrededor del mundo son tratadas con estatinas. En la tabla 13 se presentan las ventas de estas dos estatinas entre 2008 y 2012.

Tabla 13. Ventas globales de estatinas sintéticas desde 2008 a 2012

ESTATINA	VENTAS US\$ MILES DE MILLONES DE DÓLARES				
	2008	2009	2010	2011	2012
Rosuvastatina* (Crestor)	4	5,5	7,1	8,1	8,3
Atorvastatina* (Lipitor)	13,7	13,7	13,2	12,9	5,1

Fuente: IMS Health MIDAS (2012).

Aprovechamiento de los procesos ecológicos a partir de la integración de las funciones ecosistémicas en los procesos económicos.

El análisis de los procesos ecológicos asociados a los ecosistemas que son usados como: insumos, tecnologías específicas o productos por parte de los procesos económicos humanos, permiten comprender los profundos procesos de bioutilización implicados en el aprovechamiento de funciones ecosistémicas específicas. La incorporación de la polinización y el control biológico de plagas en la agricultura resultan imprescindibles para el desarrollo de la producción, dadas las características de estos procesos difícilmente sustituibles mediante tecnologías humanas.

Adicionalmente, un claro indicador de la importancia que han alcanzado las tecnologías naturales de polinización y el control biológico de plagas es el valor económico de los mismos, puesto que refleja en buena medida el costo que eventualmente debería ser asumido por la agricultura, dado el caso que fuera necesario (o posible) sustituir estos servicios prestados por la naturaleza; los cuales de hecho constituyen una externalidad positiva ofrecida por parte del capital natural sin contraprestación proveniente de la economía humana.

En la tabla 14 se presenta el resultado de un ejercicio de estimación de los valores monetarios de los bienes y servicios ecosistémicos del planeta realizado a partir de la base de datos ESVD (Searchable Ecosystem Service Value Database), tras la revisión de 320 publicaciones en las cuales se identificaron 1350 estimaciones; incluyendo las investigaciones más representativas en este campo: Constanza et al. (1997); De Groot et

al. (2006); De Groot et al. (2012) y TEEB Foundations (2009). Este estudio incluyó 10 biomas principales y cubre 22 servicios ecosistémicos con la clasificación TEEB⁷⁴.

Los valores obtenidos son comparables puesto que la base de datos ESVD ha convertido cada uno de los datos obtenidos en los estudios consultados a una unidad común de medida denominada \$/ha/año del 2007 expresada en dólares y basada en la Paridad del Poder Adquisitivo “Purchasing Power Parity” (PPP). Expresar el valor de los servicios ecosistémicos en unidades monetarias no implica que esos valores puedan ser usados como base para establecer precios y no significa que los servicios ambientales deban ser considerados como mercancías privadas que pueden ser comerciadas en mercados privados. Muchos servicios ecosistémicos no pueden –o no deberían- ser privatizados (De Groot et al. 2012:57).

La mayor parte de los valores monetarios contenidos en ese estudio, representan valores no reconocidos por el mercado, los cuales deben considerarse más bien como los beneficios que representan los servicios ambientales en cuanto deben considerarse como bienes públicos no mercadeables (De Groot et al. 2012).

⁷⁴ La economía de los ecosistemas y la biodiversidad (TEEB por sus siglas en inglés) es una iniciativa a escala mundial organizada por el programa ambiental de las Naciones Unidas y apoyado por la Comisión Europea y, los gobiernos de Alemania, Reino Unido, Holanda, Suecia, Noruega y Japón.

Tabla 14. Valor económico de las funciones, bienes y servicios ecosistémicos

FUNCIONES ECOSISTÉMICAS			VALOR MEDIO ECO-SISTEMAS (US\$/HA 1994) 1	VALOR ESTIMADO DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS						
				(US\$/HA YEAR) 2	(VALORES EN US\$ /HA/2007)					
					ARRECIFE DE CORAL 3	SISTEMA COSTERO 3	MANGLAR PANTANO Y MAREA 3	VEGETACIÓN HUMEDAL CONTINENTAL 3	RÍOS Y LAGOS 3	BOSQUE TROPICAL 4
Funciones de regulaciones	1	Regulación calidad del aire	1341	265						449
	2	Regulación Climática	684	223	1188	479	65	488		3218
	3	Regulación ante perturbaciones	1779	7240	16991		5351	2986		
	4	Regulación hídrica	1115	5445				5606		5235
	5	Oferta hídrica	1692	7600			1217	408	1808	411
	6	Retención de suelos	576	245	153214	25368	3929	2607		1084
	7	Formación del suelo	53	10						
	8	Regulación de nutrientes	17075	21100			45	1713		
	9	Tratamiento de residuos	2277	6696	85		162165	3015	187	506
	10	Polinización	117	25						
	11	Control Biológico	417	78				948		

Continúa en la página siguiente

Funciones hábitat	12	Función de refugio	124	1523		194	10648	1287		
	13	Criadero		195	16210	180	6490	1168		
Funciones de producción	14	Alimento	1386	2761	677	2384	1111	614	106	552
	15	Materias primas	721	1014	33048	12	358	425		1418
	16	Recursos genéticos	79	112	21528		10			1756
	17	Recursos medicinales					301	99		562
	18	Recursos ornamentales /elementos decorativos		145	472			114		
Funciones de información	19	Información estética		1760	11390			1292	2166	
	20	Recreación	815	6000	96302	256	2193	2211		1171
	21	Información cultural y artística	3015							
	22	Información espiritual e histórica		25		21		700		
	23	Ciencia y educación			1145	22				

Fuente: Elaboración del autor basado en 1. Constanza et al. (1997), 2. De Groot et al. (2006), 3. De Groot et al. (2012) y 4. TEEB (2009).

A continuación se detallan específicamente estos dos servicios ecosistémicos con el propósito de ilustrar las maneras en las que los procesos tecnológicos agrícolas han aprendido a aprovechar la eficacia que pueden alcanzar las poblaciones de insectos y mamíferos (entre otras especies) como agentes económicos naturales que realizan tareas de fertilización y control de plagas gracias al conocimiento acumulado en el capital natural.

En el caso de la tecnología ofrecida por las funciones ecosistémicas y su relación con las tecnologías empleadas en la agricultura tiene aplicación la idea Kenneth Boulding (1978) acerca del proceso de simbiosis entre “artefactos naturales y artefactos humanos” como expresiones de especies biológicas y especies sociales que se integran en un mismo proceso productivo. Dado que los artefactos humanos son capaces de entablar relaciones ecológicas entre sí y con los artefactos biológicos.

9.3. La polinización natural y los procesos agroindustriales.

La polinización es un servicio ecosistémico esencial para el mantenimiento de la producción agrícola. Los polinizadores tales como abejas, mariposas, pájaros y murciélagos, proveen sustanciales beneficios para el mantenimiento, la diversidad, y la productividad de la agricultura y los ecosistemas naturales. Un tercio de la producción de alimentos mundial directa o indirectamente depende de la polinización de insectos (Richards 1993). Aunque muchos de los cultivos principales son independientes o polinizados por el viento, otros requieren y se benefician de polinización por insectos para aumentar la calidad o aumentar rendimientos (Richards 1993). La productividad de algunos cultivos, como las almendras, depende sensiblemente de la polinización de los insectos, puesto que la cantidad de producción depende directamente de la polinización - de las abejas-. En otros casos, la polinización provista por las abejas es importante porque afecta el tamaño, forma y calidad del fruto. Según Gordon y Davis (2003: 30) una gran variedad de cultivos dependen de un insecto como polinizador principal, llegando el nivel de dependencia en algunos casos a situarse en el rango 80-100% (manzana, mango, cebollas, calabazas y, melón).

La polinización involucra la transferencia de la información genética entre las plantas a través del polen, la cual es requerida para la reproducción sexual de las plantas. En otras palabras, la polinización consiste en la fertilización de las plantas florecidas mediante la transferencia de polen, por parte distintos tipos de insectos (en especial las abejas). Existen dos tipos de polinizadores: “silvestres y domesticados” (wild and managed). Los servicios de los polinizadores silvestres (naturales) no son comerciados en el mercado, por lo tanto su valor es subestimado o no se tiene en cuenta en el mercado. Los insectos son el grupo más grande de polinizadores y, las abejas proporcionan aproximadamente 80% de toda la polinización por insectos (Robinson et al. 1989).

El valor del servicio ecosistémico de la polinización entendido como una aproximación a la importancia del mismo, y al grado de interdependencia que existe entre la agricultura humana y la polinización, ha sido trabajado ampliamente por diversos autores, en la tabla 15 se presentan algunos de estos estudios. El valor económico total del servicio de polinización prestado por los insectos para la producción económica agrícola mundial fue estimado por Pimentel (1997) en \$200 billones de dólares. De igual forma, el estudio de Gallai et al. (2009) calculó este valor, el cual fue de €153 billones de euros, que representaba el 9.5% del valor de la producción agrícola mundial usada para la alimentación humana en el año 2005.

En Estados Unidos el valor económico de la polinización de las abejas fue estimado por Southwick y Southwick (1992) en \$6 billones de dólares. También, Morse y Calderone (2000) estiman el aumento del valor anual de la producción agrícola atribuible a la polinización de la abeja en \$14.6 billones de dólares. Un estudio más reciente, Losey y Vaughan (2006) encontraron que los polinizadores naturales –casi exclusivamente las abejas- pueden ser responsables de \$ 3.07 mil millones de dólares de la producción agrícola de frutas y verduras en los Estados Unidos.

Tabla 15. Valor económico de la polinización por región⁷⁵.

PAÍS	VALOR DE LA POLINIZACIÓN	POLINIZADOR	FUENTE
Estados Unidos	US\$6 billones	Abejas	Southwick and Southwick (1992)
Estados Unidos	US\$14.6 billones	Abejas	Morse and Calderone (2000)
Estados Unidos	US\$3.07 billones	Insectos naturales	Losey and Vaughan (2006)
Reino Unido	£202 millones	Insectos (abejas)	Carreck and Williams (1998)
Australia	AUS \$1.7 billones	Abejas	Gordon and Davis (2003)
Australia	US\$1.2 billones	Abejas	Gibbs y Muirhead (1998)
Mundo	US\$200 billones	Insectos	Pimentel et al (1997)
Mundo	€153 billones	Insectos	Gallai et al (2009)
Unión Europea (25 miembros)	€14.2 billones	Insectos	Gallai et al (2009)

Fuente: Elaboración del autor

⁷⁵ Los valores no son comparables debido a que usan distintas metodologías. Los valores se muestran para efectos ilustrativos del valor del servicio de polinización pero no deben tomarse como una evaluación exacta de valor de este servicio

En otros países alrededor del mundo se ha estimado el valor de la polinización, entre esos estudios se encuentra: Carreck y Williams (1998), quienes para el Reino Unido estiman el valor de polinización de las abejas melíferas y los abejorros para los cultivos en los cuales las estadísticas del mercado están disponibles, es de £172,2 millones de libras para cultivos al aire libre y £29.8 millones de libras para los cultivos de invernadero, es decir que excede los £200 millones de libras. En Australia, Gibbs y Muihead (1998) estiman el valor de la polinización de las abejas en \$1.2 billones de dólares y Gordon y Davis (2003) estiman que ese valor es de \$1.7 billones de dólares australianos. De igual manera, el estudio de Gallai et al. (2009) estima el valor de la polinización de insectos para la Unión Europea (25 países) en €14.2 billones de euros.

Desde el punto de vista de los beneficios, la polinización no se limita al aumento de la productividad en la agricultura, también está asociada al denominado efecto desbordamiento de la polinización “Spillover pollination” (Morse y Calderone 2000: 3), el cual se basa en el hecho de que la polinización beneficia tanto a la agricultura comercial y no comercial, sin existir retribución alguna por estos servicios. Desde el punto de los costos, se ha verificado una disminución gradual pero continua del servicio ecosistémico de la polinización. Las causas de la disminución de este servicio ecosistémico son entre otras: la pérdida de hábitat para los polinizadores, debido a que los polinizadores requieren áreas naturales para anidación, reposo y forrajeo (urbanización e intensificación de la agricultura), parásitos y enfermedades y el uso intensivo de pesticidas.

En el caso de los pesticidas, en el Estados Unidos, las poblaciones naturales (silvestres) de las abejas están disminuyendo en las regiones agrícolas (Richards 1993). En California, por ejemplo, el hábitat posee alteraciones provocadas por el uso de pesticidas, lo cual ha dado lugar a la reducción, de las abejas silvestres, lo que obligó a los agricultores a depender del alquiler de colonias de abejas para la polinización (Pimentel et al. 1997).

9.4. El control biológico de plagas integrado a la agricultura

Dentro del campo de control biológico de plagas existen múltiples definiciones acerca de las estrategias de control biológico de plagas provenientes de muchas disciplinas (Ecología, Entomología, Microbiología, Fitopatología, Agronomía, Veterinaria; entre otras), cada una de las cuales cuenta con una terminología propia, a pesar de que analizan y describen procesos equivalentes, lo que ha llevado a que se generen serias dificultades para alcanzar una terminología unificada.

En un intento de armonizar la terminología, Eilenberg et al. (2001:390) definen el control biológico de plagas como “el uso de organismos vivos para eliminar la densidad poblacional o el impacto de un organismo plaga específico, haciéndolo menos abundante o menos perjudicial de lo que sería de otro modo sería”.

Los autores proponen una clasificación para el control biológico de plagas en las siguientes estrategias:

1. Control Biológico Clásico: La introducción intencional de una especie exótica, generalmente co-evolucionada, como agente de control biológico para el establecimiento permanente y el control de plagas a largo plazo. Esta estrategia no requiere de liberación adicional de agentes de control.
2. Control Biológico por inoculación: La liberación intencional de un organismo vivo como un agente de control biológico con la expectativa de que se reproduzcan y controle la plaga durante un largo período, pero no de manera permanente. Esta estrategia requiere liberaciones sucesivas a la inicial porque el control alcanzado es temporal.
3. Control Biológico por inundación: El uso de los organismos para controlar las plagas cuando se logra el control exclusivamente con los organismos liberados inicialmente y no es necesario emplear sus descendientes”.
4. Control Biológico por conservación: Las Modificación del ambiente o las prácticas existentes para proteger y mejorar enemigos naturales específicos u otros organismos para reducir el efecto de las plagas”

Van Lenteren (2011) presenta algunas cifras que dan idea sobre la magnitud que ha alcanzado el control biológico de plagas en sus diversas modalidades. El autor plantea que el control biológico natural, es decir aquel que se da sin intervención humana, para los ecosistemas terrestres del mundo (tierra y vegetación) se estima en 89,5 billones de hectáreas, de los cuales 44.4 billones de hectáreas se utilizan para algún tipo de actividad agrícola (incluidas la silvicultura y pastizales). En cuanto al control biológico clásico, se estima que es aplicado en 350 millones de hectáreas (10% de las tierras agrícolas). Por otra parte, se estima que el control biológico de plagas comercial, es aplicado en 16 millones de hectáreas (0,4% de las tierras agrícolas).

Con relación al número de especies usadas como agentes de control, el autor señala que 230 especies de enemigos naturales invertebrados que están disponibles en el mercado para ser utilizadas en el manejo de plagas en todo el mundo. En Europa, se usan aproximadamente 170 especies de enemigos naturales invertebrados para el control biológico de plagas.

A nivel mundial, están activos 30 grandes productores comerciales del control Biológico de plagas (Bolckmans 2008), de los cuales 20 se encuentran en Europa. Además de estos grandes productores, se estima que alrededor de 500 pequeños productores comerciales están activos. Los productores se organizaron en diferentes asociaciones: en Europa en la Asociación Internacional de Biocontrol Manufactureros (IBMA), en América del Norte, en la Asociación de Productores naturales de control biológico (ANBP), en Australia en

Control Biológico Australiano (ABC) y en Brasil en la Asociación Brasileña de control Biológico (ABCbio).

El grado de adopción del control biológico de plagas está limitado, entre otras razones, según plantea Van Lenteren (2011: 16-17) por los siguientes aspectos:

- Investigación: La escogencia de la mejor aplicación para el control de plagas implica la comparación entre diferentes alternativas, de las cuales no se cuenta con la suficiente información y/o conocimiento acerca del funcionamiento del sistema depredador-plaga-cultivo.
- Oferta del control de plagas: La industria de los plaguicidas no está interesada en el control biológico, debido a que los enemigos naturales no pueden ser patentados, no se puede almacenar durante largos períodos de tiempo, no se puede combinar con algún producto químico de control y necesita formación adicional de características de cultivos y agricultores.
- Directrices y regulaciones: Las barreras comerciales fitosanitarias que implican la regulación de la exportación, envío, importación y liberación de agentes de control biológico y otros organismos benéficos. Además de las directrices para Evaluación del Riesgo Ambiental y las regulaciones en cada país para la importación y la liberación de agentes de control biológico, lo cual implica un retraso en la aplicación del control biológico.

El control biológico de plagas se caracteriza como un caso de bioutilización porque la tecnología o las técnicas que los humanos han desarrollado para controlar las plagas en la agricultura incorporan especies, organismos ó individuos naturales para que sean usados o realicen procesos en beneficio del ser humano.

Algunos estudios han realizado una valoración económica del control biológico de plagas a nivel mundial (ver tabla 16). Pimentel et al. (1997) estima que el control biológico de plagas en cultivos alcanza aproximadamente un valor económico de \$60 billones por año. Constanza et al. (1997) calculó el valor económico de esta función ecosistémica en \$400 billones de dólares. El estudio de Naylor y Ehrlich (1997) estima el valor económico mundial del control de plagas entre US\$54 billones y US\$1 trillón de dólares. En un estudio más reciente, Losey y Vaughan (2006) estiman que el valor económico es de US\$13,60 billones de dólares.

Los ejercicios de valoración concretas nos ilustran el control biológico de plagas como un bien público prestado por los ecosistemas se presentan en la tabla 17.

Tabla 16. Estudios de valoración económica mundial del control biológico de plagas

ESTUDIOS REALIZADOS	VALOR ECONÓMICO MUNDIAL DEL CONTROL BIOLÓGICO DE PLAGAS
Pimentel et al. (1997)	US\$60 billones de dólares
Constanza et al. (1997)	US\$400 billones de dólares
Naylor y Ehrlich (1997)	Entre US\$54 billones y US\$1 trillón de dólares
Losey y Vaughan (2006)	US\$13.60 billones de dólares

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 17. Valor económico del control biológico de plagas

PAÍS	CULTIVO	PLAGA	ENEMIGO NATURAL	VALOR ECONÓMICO	FUENTE
Estados Unidos (Illinois, Indiana, Iowa, Michigan y Minnesota en 2005)	Soya	Aphis glycines Matsumura (áfido de soya)	22 especies de depredadores, 6 especies de parasitoides, y varias especies de hongos.	\$84 millones de dólares	Zhang y Swinton (2012)
Estados Unidos (Iowa, Michigan , Minnesota y Wisconsin 2007–2008)	Soya	Aphis glycines Matsumura (áfido de soya)	Depredadores generalistas, en particular Coleoptera: Coccinellidae (mariquitas)	Por lo menos US\$239 millones de dólares	Landis, Gardiner, Van der Werf y Swinton (2008)
Estados Unidos (Texas)	Algodón	Helicoverpa zea (Gusano del maíz-Gusano elotero), Spodoptera frugiperda (Oruga cogollera)	Murciélago de cola suelta brasileño (Tadarida brasiliensis)	US\$638 mil dólares	Cleveland, Betke, Federico, et a(2006)
Estados Unidos (Texas)	Algodón	Helicoverpa zea (Gusano del maíz-Gusano elotero)	Murciélago de cola suelta brasileño (Tadarida brasiliensis)	US\$500 mil dólares	Betke et al. (2008).
México (Nuevo León 2004-2005)	Sorgo, maíz, cítricos y nuez	(Drosophila melanogaster) Mosca de la fruta, Cicadellidae (Chicharritas) y Aphididae (Pulgones), Trichoplusia ni (gusano falso medidor), Spodoptera (Gusano cogollero); entre otras plagas.	Murciélago de cola suelta brasileño (Tadarida brasiliensis mexicana)	Entre \$6.5-\$16.5 millones de pesos mexicanos	Gándara, Correa y Hernández (2006).

Fuente: Elaboración del autor.

9.5. El árbol *taxus brevifolia* como fuente de un compuesto esencial en las terapias anticancerígenas.

La bioutilización de las propiedades terapéuticas de diversas especies del árbol *Taxus brevifolia* se remonta a su aplicación por parte de la medicina ayurvédica para el tratamiento del cáncer en la India, así como también por parte de algunas tribus americanas para el tratamiento de enfermedades no cancerígenas (Cragg y Newman 2005:74). En años recientes, el árbol *taxus* ha sido usado para producir paclitaxel o taxol (nombre comercial) un fármaco aprobado por Administración de Alimentos y Medicamentos “Food and Drug Administration” (FDA) para el tratamiento de cáncer: refractario de ovario, de mama metastásico, de pulmón y sarcoma de Kaposi.

Por otra parte, en su análisis del papel que han desempeñado las plantas en los sistemas de medicina tradicional y en el descubrimiento de nuevos medicamentos, Prakash et al. (2009) señalan que el uso de esta planta ha tenido dos propósitos específicos frente a la provisión de medicamentos para el tratamiento de enfermedades humanas; en primer lugar, como compuesto bioactivo aislado para ser utilizado directamente como medicina y en segundo lugar, como fuente estructural que conduce a la semisíntesis del compuesto para producir medicinas patentables; con lo cual quedan claras las dos formas de aprendizaje desde capital natural: bioutilización primaria y secundaria.

En el año 1962 los investigadores del *Department of Agriculture* de los Estados Unidos en coordinación del *National Cancer Institute* (NCI) comenzaron a recolectar las primeras muestras con el propósito de descubrir si algunos árboles contenían compuestos anticancerígenos, entre esas especies de árboles estaba el tejo del Pacífico (*Taxus brevifolia*). Sin embargo, fue una década después, cuando Wani et al. (1971), un grupo de investigadores del NCI, aislaron y determinaron la estructura de un compuesto activo a partir del *Taxus brevifolia*, que llamaron Taxol:

“informamos sobre la estructura de un nuevo compuesto llamado taxol, aislado de la corteza del tallo del tejo occidental, *Taxus brevifolia*. Taxol tiene propiedades potentes antileucémicas e inhibidoras de tumores...” (Wani et al. 1971:2325).

En el año 1977, la NCI confirmó la actividad antitumoral del paclitaxel. En el mismo año, la Dra. Susan Horwitz, del *Albert Einstein College of Medicine de la Universidad Yeshiva*, se le otorgó una subvención por parte del NCI para estudiar el mecanismo de acción y su uso en el tratamiento de cáncer de Taxol. Horwitz encontró que el Taxol era capaz de unirse al ensamblaje de los microtúbulos de la célula, impidiendo la coordinar de la división celular. En el año 1979, Horwitz también trabajó con extractos del árbol *Taxus baccata*. Después de estudiar la semi-síntesis de taxol a partir de este intermedio metabólico, lograron la producción de un compuesto análogo denominado docetaxel o Taxotere® (nombre comercial) registrado por

parte de la farmacéutica Sanofi-Aventis, con propiedades similares al taxol (Malik et al. 2011:23).

Pasó tiempo para que se llevaran a cabo ensayos clínicos debido a problemas en la recolección de Taxol y en la síntesis del compuesto. En el año 1984, el NCI inició la fase I en los ensayos clínicos de Taxol contra distintos tipos de cáncer. En el año de 1989, investigadores de la Universidad Johns Hopkins reportaron que el taxol produce una respuesta parcial o completa en el 30% de los pacientes con cáncer de ovario avanzado. A comienzos de los noventa, en el año 1991, el NCI firmó un acuerdo con la empresa farmacéutica Bristol Myers Squibb (BMS), en el cual se concedieron los derechos exclusivos de la información de las investigaciones realizadas hasta ese momento para lograr la aprobación de la medicina en la FDA. En el año 1992, la FDA aprobó el Taxol para el tratamiento del cáncer de ovario. También se probó la eficacia de Taxol para el tratamiento del cáncer de mama avanzado. Los ensayos clínicos posteriores descubrieron que el fármaco era eficaz contra esta enfermedad, y, en 1994, la FDA aprobó el Taxol para el uso contra el cáncer de mama⁷⁶.

A finales de los noventa, en el año 1997, BMS obtuvo la aprobación de Taxol Inyección para el uso en el tratamiento del Sarcoma de Kaposi y del carcinoma avanzado de ovario en combinación con cisplatino por parte de la FDA⁷⁷. En el año 1999, el Paclitaxel encapsulado en liposomas (LEP) fue licenciado para Pharmacia Corporation. En el año 2000, la FDA aprobó la primera versión genérica de la droga en Estados Unidos, llamada Onxol por el laboratorio Ivax.

La importancia de la naturaleza para la producción del Taxol es evidente porque depende de la obtención del compuesto activo a través de la recolección de árboles vivos de diversas especies de tejo (*taxus brevifolia*, *baccata*, *chinensis* entre otras), es decir, depende de la escasez del recurso vegetal:

“El Taxol se encuentra en bajas concentraciones en las agujas, corteza, y raíces de *Taxus* spp...Por ejemplo, se necesitan 13.500 kg de corteza de 3.000 árboles de *T. brevifolia* (tejo del Pacífico, la especie más productora) para obtener alrededor de 1 kg de Taxol...y se requieren 2g de Taxol para un completo régimen de tratamiento antitumoral durante varios meses en un paciente con cáncer” (Barrales y De la Rosa 2014:4).

El caso del taxol es especialmente relevante y paradigmático para la ilustración de la importancia de la bioutilización como elemento que puede alcanzar el nivel de componente imprescindible para el funcionamiento u operación de tecnologías humanas porque si bien es cierto que la producción de taxol se puede obtener de métodos alternativos, como la síntesis química total o semisíntesis química; éstos pueden involucrar procesos caros, complicados o de baja producción. Por otra

⁷⁶ Véase http://dtp.nci.nih.gov/timeline/flash/success_stories/S2_taxol.htm

⁷⁷ Véase <http://www.cancernetwork.com/articles/odac-votes-yes-taxol-kaposi-sarcoma>

parte, otra alternativa para producción del taxol es también una forma de bioutilización. Los procesos de cultivo in vitro de callos y células en suspensión de Taxus para producción de Taxol y taxoides relacionados es el uso de sistemas de fermentación de hongos in vitro (Barrales y De la Rosa 2014:4).

En cuanto al mercado farmacéutico, el Taxol es uno de los medicamentos contra el cáncer de mayor venta a nivel mundial. Las ventas anuales de la droga, para BMS alcanzaron su punto máximo en 2000, US\$ 1,6 mil millones y después de este año decrecieron las ventas debido a la aprobación y lanzamiento al mercado de la primera versión genérica del paclitaxel. En la tabla 18 se muestran las ventas anuales del taxol de BMS entre 1993 y 2008.

Tabla 18. Ventas mundiales de Taxol de BMS

AÑO	MILLONES DE DÓLARES
1993	162
1994	344
1995	580
1996	813
1997	941
1998	1204
1999	1453
2000	1561
2001	1112
2002	857
2003	934*
2004	991*
2005	747*
2006	563**
2007	422**
2008	385**

Fuente: Government Accountability Office (2003, 16), * Bräse y Banert (2011, 46) y **Jonhson (2012:14).

9.6. Medicamentos que incorporan componentes biomarinos.

Durante mucho tiempo, los seres humanos han usado los organismos marinos vivos, o parte de ellos, para producir o modificar medicamentos:

“Los extractos de organismos marinos se han utilizado con fines medicinales en China, la India, el Cercano Oriente y Europa desde la antigüedad. Los científicos ya han llegado a apreciar que muchos de estos remedios contienen medicamentos potentes. Esfuerzos sustanciales ahora están

siendo dirigidos al estudio de sus agentes activos. Por ejemplo, diversas algas marinas se han utilizado para tratar la hidropesía, dificultades menstruales, trastornos gastrointestinales, abscesos, y el cáncer. Esponjas, que contienen altos niveles de yodo, se han utilizado para tratar tumores, bocio, disentería y diarrea” (Libes 2009: 12).

Varios autores se han referido a los medicamentos que usan organismos marinos vivos (Pomponi 1999, Schwartzmann et al. 2001, Menéndez 2005, European Science Foundation 2010, Newman y Cragg 2014; entre otros) argumentando sus características estructurales únicas. Incluso se ha señalado que estos recursos marinos están inexplorados y que es necesario intensificar esfuerzos para descubrir compuestos con potencial para un mayor desarrollo de productos tales como cosméticos, suplementos nutricionales y alimentos funcionales (Libes 2009:72).

De esta manera, con propósito ilustrativo, se presenta información de 27 productos médicos derivados de organismos marinos. De acuerdo a su etapa de desarrollo se dividen en: disponibles en el mercado (12 productos), discontinuados, retirados del mercado (4 productos) y en etapa de pruebas clínicas (11 productos), y nos centraremos específicamente en dos productos que se encuentran en el mercado, Yondelis® y Vent®.

Tabla 19. Productos médicos que usan componentes marinos.

PRODUCTO	ORIGEN NATURAL	MARCA, EMPRESA Y ETAPA DE DESARROLLO	DESCRIPCIÓN	PATENTE
Cyclovir , Herpex , Acivir , Acivirax , Zovirax , Zoral y Xovir	Esponja Marina <i>Cryptotethya crypta</i> (Caribe)	Aciclovir® (Glaxo, Wellcome), Zovirax® (Mylan y ARA Pharma Medical)-Disponible	Droga Antiviral (infecciones por Herpes tipo 1 y 2 y Virus varicela-zóster)	US 5,883,103
Ara – C (cytosar – U, cytarabine)	Esponja Marina <i>Cryptotethya crypta</i> (Caribe)	Cytarbine® (Pharmace & Upjon) - Disponible	Droga Anticancerígena (linfoma no Hodgkin, leucemia mielógena crónica y linfocítica aguda)	WO 2001021135 A2, WO 2001021135 A3, WO 2010107960 A1
Ziconotide	Caracol: <i>Conus geographicus</i> , <i>Conus magus</i> (MOLLUSCA)	Prialt® (Elan Pharmaceutical-Azur Pharma-Warner Lambert) -Disponible	Analgésico no narcótico	US 5,364,842
Ecteinascidin 743/Trabectedin	Tunicate Ecteinascidia turbinata-Ascidia (Caribe)	Yondelis® (PharmaMar-Ortho Biotech)-Disponible	Agente anti-cáncer a través de la inducción de apoptosis	US 7,115,743 B2
Okadaic Acid	Dinoflagelado	Okadaic Acid (AG Scientific, Sigma-Aldrich)-Disponible	Sonda molecular: inhibidor de la fosfatasa (tratamiento contra el cáncer)	US 5,206,141
Manoalide	Esponja Marina <i>Luffariella variabilis</i> (Indo-Pacific)	University of California-Berkeley, Manoalide® (Cayman Chemical Company) Sigma®, (Sigma-Aldrich)-Descontinuado	Inhibidor Phospholipase A2: Propiedades analgésicas y antiinflamatorias (artritis reumatoide)	US 4,447,5
Aequorin	Medusa Bioluminiscente <i>Aequorea victoria</i>	Aequorin (Calcium Aequorin Imaging Lab), BacMam Aequorin (BacMan)	Indicador Bioluminiscente del Calcio: Medición intracelular de Calcio	US 5,093,240, US 7,445,925

Continúa en la página siguiente

PRODUCTO	ORIGEN NATURAL	MARCA, EMPRESA Y ETAPA DE DESARROLLO	DESCRIPCIÓN	PATENTE
GFP (proteína Fluorescente Verde)	Medusa Bioluminiscente Aequorea victoria		Reportador de Genes: Estudio del cáncer, transplantes (otros)	US 6,800,492 B2, US 5,958,713 (otras)
Latrunculin B	Esponja Marina Latrunculia magnifica (Golfo de Eilat)	Molecular Probes®-vendida para hacer investigaciones -Preclínica	Agente inhibidor de la polimerización de la actina	US 2007,0225343 A1, US 2011,0136880 A1
Mycalolide-B	Esponja Marina Mycale sp. (Japón)	Mycalolide-B (Santa Cruz Biotechnology Inc, Enzo Life Science- Investigaciones	Agente inhibidor de la polimerización de la actina (carcinoma y leucemia)	US 5,760,065
Swinholide A	Esponja Marina Theonella swinhoei	Swinholide A (Sigma-Aldrich, AdipoGen)- Investigaciones	Agente Citotóxico potente (tratamiento contra el cáncer)	WO 2007068776 A1, WO 1996001627 A1
Bryostatin	Bryozoan Bugula neritina (Golfo de California y de México)	Arizona State University (German pharmaceutical company Biotech, Pettit)-Pruebas Clinicas	Inhibidor (anti-cáncer y inmunosupresora)	
Dolastatin	Liebre Marina Dollabella auricularia (Océano Índico)	Descontinuada en las Pruebas Clinicas Fase II (Pettit)	Agentes interactivos tubulina	US 4,978,744
Discodermolide	Esponja marina (Caribe) Discodermia dissoluta	Novartis, HBOI-Descontinuida	Inhibidor potente del crecimiento celular del tumor	US6,506,910 B1, US 6,127,406, US 6,495,594 B2
Isohomo-halichondrin B	Esponja Marina Lissodendoryx sp.	Pharmaceutical company Eisai- Pruebas Clínicas	Agente Citotóxico potente (tratamiento contra el cáncer)	EP 0 572 109 B1
Bengamide	Esponja Marina Jaspis cf. Coriacea (Islas Fiji)	Novartis, HBOI-Descontinuida	Inhibidor del crecimiento tumoral	US 7,585,855 B2, US 4,831,135

Continúa en la página siguiente

PRODUCTO	ORIGEN NATURAL	MARCA, EMPRESA Y ETAPA DE DESARROLLO	DESCRIPCIÓN	PATENTE
Hemiasterlins A & B	Esponjas Marinas Auletta sp. Y Siphonochalina sp	University British Columbia (Wyeth-Ayerst)- Pruebas Clínicas	Agentes citotóxicos interactivos y tubulina (antitumoral)	US 2007,0026478 A1
Girolline	Esponja Marina Pseudaxinyssa cantharella	Rhone-Poulenc Rorer Inc- Descontinuada	tratamiento contra el cáncer	US 4,801,602
Aplidine	Tunicate Aplidium albicans (Mediterraneo)	Aplidin® (PharmaMar)-Pruebas Clínicas	Agente anti-cáncer a través de la inducción de apoptosis	US2009,0298752 A1, WO 2007054748 A1, WO 2003033013 A1, US 7,381,703 (otras)
Isogranulatimide	Tunicate Didemnum granulatum-Ascidia	(Kinetik)-Pruebas Clínicas	Agentes citotóxicos (leucemia, cáncer de próstata, Colon y pulmón)	WO 2009127059 A1
Kahalalide F	Molusco herbívoro marino Elysia rufescens (Hawaii)	(PharmaMar)-Pruebas Clínicas	Agentes citotóxicos (cáncer de próstata y mama)	WO 2002036145 A2
Thiocoraline	Bacteria actinomiceto Micromonospora marina (Mozambique)	(PharmaMar)-Preclínica avanzada	Agente anticancerígeno (cáncer de mama, de colon, renal, y de melanoma).	EP 1 925 668 A2
Calyculin A	Esponja marina Discodermia calyx	Calyculin A (AG Scientific)- Disponible	Inhibidor potente de la proteína fosfatasas (leucemia, la diabetes mellitus tipo 2).	EP0551200A1

Continúa en la siguiente página

PRODUCTO	ORIGEN NATURAL	MARCA, EMPRESA Y ETAPA DE DESARROLLO	DESCRIPCIÓN	PATENTE
Formulaid	Microalga Marina (Cryptocodinium cohnii)	Formulaid® (Martek Biosciences, Columbia, MD)- Disponible	suplemento nutricional infantil que contiene ácidos grasos	US 5,374,657
Pseudopterosin	gorgonáceos Pseudoptero-gorgia elisabethae (Coral blando-Caribe)	Resilience® (Estée Lauder)- Disponible	Compuesto anti-inflamatorio fuerte y actividad analgésica (artritis, cáncer pulmón, cáncer Próstata, Malaria avanzada, antituberculosis).	US 2002,0091093 A1, US 7,060,686 B2, US6,046,041, US5,624,911
R-Phycoerythrin / Phycoerythrin	Alga Roja	ProZyme® (OSMAN International Group S.A.)- Disponible	Proteína con diversas aplicaciones biotecnológicas (Pruebas Clínicas ELISA y citometría de flujo)	US 5,358,858, US 4,857,474
ADN Polimerasa termoestable	Arqueobacteria Thermophilic (Thermus aquaticus Taq, Pyrococcus furiosus, Thermus thermophilus, Thermus flavus, Thermococcus litoralis, y Pyrococcus species GB-D)	Vent® (New England Biolabs, Inc.)-Disponible	Enzima para la reacción en cadena de la polimerasa PRC (hepatitis B y C ó VIH, hemofilias A y B, distrofia muscular y la fibrosis quística, diabetes tipo I y enfermedad celíaca y células cancerosas)	US4,889,818, US 5,322,785, US 5,436,149, US 5,789,224, US5,512,462 , US 6,280,998 B1, US 6,632,645 B1, WO 1996014405 A3, WO 2001023583 A3, US 6,673,585 B1, US 6,713,281 B2, US 7,045,328 B2 y US 7,214,522 B2

Fuente: Elaboración del autor

El reporte de la Organización para la Cooperación económica y el (OCDE) dedicado al análisis de la biotecnología marina del año 2013, derivado del Foro Global de Biotecnología llevado a cabo en Vancouver (Canadá), estima en 2.8 billones de euros el valor total del mercado mundial de productos y procesos propios de la biotecnología marina; igualmente contiene valiosa información acerca del valor que alcanzan en el mercado algunos de los productos derivados de organismos marinos (esponjas marinas, bacterias, etc.). La siguiente tabla 20 ilustra el valor de las transacciones de mercado para productos derivados de las esponjas marinas, las bacterias y la biomasa marina.

Tabla 20. Valor de Mercado de productos farmacéuticos.

PRODUCTO	VALOR DE MERCADO
PRODUCTOS FARMACÉUTICOS DERIVADOS DE LAS ESPONJAS MARINAS	
Ara A /Ara C	50-100 millones de dólares /año
Resilience®	3-4 millones de dólares /año
PRODUCTOS DERIVADOS DE LAS BACTERIAS	
DNA polymerase	5000 millones de dólares /año
PRODUCTOS DERIVADOS DE LA BIOMASA MARINA	
Polisacáridos	1.018 billones de dólares (2010)
Chitin – Chitosan	481 millones de dólares
Alimentos y Suplementos	270 billones de dólares (2008)
Ingredientes Marinos para Aceite Omega 3	244 millones de dólares (2009)

Fuente: OECD (2013)

La Ascinia Tunicate, la Trabectedina y la lucha contra el Cáncer.

La Trabectedina o el Ecteinascidin 743, conocida por su nombre comercial Yondelis® es un agente activo con actividad anticancerígena comercializado por la compañía española PharmaMar en Europa para el tratamiento del sarcoma de tejidos blandos y el cáncer de ovarios. Durante las décadas de los años cincuenta y sesenta, el National Cancer Institute (NCI) de los Estados Unidos de Norteamérica llevó a cabo un programa para encontrar compuestos con propiedades anticancerígenas a partir de organismos marinos. En 1969 la trabectedina se extrajo de una especie marina: la Ascidia Tunicate Ecteinascidia turbinata que se encuentra en el mar Caribe. Tres décadas después, en el año de 1990, el químico Kenneth Rinehart, de la Universidad de Illinois logró aislar el principio activo del compuesto, las muestras originales las obtuvo de la *Ecteinascidia cornetes* en los arrecifes de la Indias Occidentales (Rinehart y Holt 1992).

La historia del desarrollo de este medicamento anticancerígeno revela claramente la modalidad de bioutilización secundaria como estrategia de aprovechamiento de

las propiedades contenidas en los extractos *Ascidia Tunicate* puesto que la patente del medicamento finalmente (Yondelis®) producido para el mercado se basa en el descubrimiento de un expresión semisintética de la Ecteinascidin 743.

En 1994 la empresa española PharmaMar obtuvo la licencia del compuesto por parte de la Universidad de Illinois. Sin embargo, se enfrentaban a la dificultad de aislar un fármaco a partir de un organismo marino, puesto que se requiere de 1 tonelada de *Ascidia Tunicate* para aislar tan solo 1 gramo de trabectedina, lo cual implica un rendimiento muy bajo. Los intentos de "cultivar" ascidias alcanzaron un éxito muy limitado, fue muy difícil alcanzar la cantidad requerida para iniciar los ensayos clínicos (un mínimo de cinco gramos del compuesto), por lo que la búsqueda de un método sintético de preparación era una alternativa deseable⁷⁸.

En 1996, el químico Elias James Corey y su equipo de la Universidad de Harvard avanzaron en un método sintético, publicado en el artículo: "Enantioselective Total Synthesis of Ecteinascidin 743" de Journal American Chemical Society (Corey et al. 1996). En el año 1998, un método semi - sintético más eficiente fue patentado por la Universidad de Harvard (Corey y Gin 1998) y fue licenciado para PharmaMar.

En ese mismo año, iniciaron las pruebas clínicas de la trabectedina con humanos. Sin embargo, fue hasta el año 2007 que la European Medicines Agency (EMA) autoriza la comercialización de Yondelis® para el tratamiento del sarcoma de tejidos blandos. La compañía Johnson y Johnson obtuvo los derechos en Estados Unidos y el resto del mundo, excepto en Japón y Europa, de la comercialización de Yondelis®. En 2009, PharmaMar recibió la aprobación final europea para el uso de Yondelis® en el tratamiento de cáncer de ovario. Actualmente, la trabectedina se encuentra también en ensayos de fase II para el cáncer de próstata, mama y cánceres pediátricos.

Estudios científicos independientes confirman la bioutilización de la *Ecteinascidia turbinata* en la producción de medicamentos, entre ellos Yondelis®. Erba et al. (2001) se refieren a la ecteinascidina como un alcaloide de tetrahidroisoquinolina marino aislado de *Ecteinascidia turbinata*, tunicado que crece en las raíces de mangle a lo largo del mar Caribe, el cual ha demostrado actividad antitumoral muy potente en sistemas preclínicos y resultados alentadores en la fase I de ensayos clínicos se ha investigado a nivel celular. Van Kesteren et al. (2003) señalan que la trabectedina es un agente antitumoral derivado de una fuente marina y resaltan sus propiedades químicas, modo de acción, metabolismo y estudios preclínicos y clínicos. Mayer et al. (2010) mencionan que Yondelis® fue el primer agente anticáncer de origen marino aprobado en la Unión Europea para los pacientes con sarcoma de tejidos blandos y los pacientes cáncer de ovario. En estudios más recientes, se indican beneficios del uso de la trabectedina con otros agentes anticancerígenos en estudios preclínicos, lo que ha llevado a varios estudios clínicos, entre las combinaciones autorizadas por la Comisión Europea se encuentran

⁷⁸ Véase <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/jo00302a007>

doxorubicina liposomal pegilada-trabectedina para el tratamiento de pacientes con cáncer de ovario recurrente platino-sensible (D'Incalci y Galmarini 2010).

Según los reportes anuales de Zeltia⁷⁹ (grupo de empresas químico-farmacéuticas y de biotecnología a la cual pertenece PharmaMar), las ventas de Yondelis® en el año 2011 fueron de € 74,2 millones, mientras que para el año 2012 cayó a € 66,2 millones, debido a la escasez del medicamento Caelyx que se administra en combinación con Yondelis® contra el cáncer de ovario. Cuando se restauró el suministro de este medicamento complementario en el año 2013, los ingresos netos de Yondelis aumentaron un 10%, alcanzando los €73 millones y representando el 56% de las ventas netas del Grupo Zeltia.

*La bacteria *Thermus Aquaticus* y la detección de enfermedades.*

El mercado mundial del diagnóstico molecular es una de las áreas de negocio más dinámicas en el sector farmacéutico (Roche 2013) y la tecnología más sobresaliente en este mercado depende de la bacteria *Thermus aquaticus* y que provee una enzima denominada Taq polimerasa que es la clave para el desarrollo de la técnica de reacción en cadena de la polimerasa (PCR). Dos contribuciones importantes se destacan en el desarrollo de esta tecnología: en primer lugar el descubrimiento de Thomas Dale Brock sobre la existencia de organismos aeróbicos que viven a muy altas temperaturas (70°-79°) y en segundo lugar, a partir de esta propiedad de resistencia a las altas temperatura de la *Thermus*, los desarrollos de Gelfand et al. (1989) y Mullis et al. (1986), permitieron aislar la Taq polimerasa de este organismo que se incorpora en la PCR, aporte de tal importancia que significó la obtención del Nobel de química para este último investigador.

La taq polimerasa fue aislada de las aguas termales del parque nacional de Yellowstone en Estados Unidos, por el microbiólogo Thomas Dale Brock en el año de 1966. La polimerasa Taq es capaz de soportar las condiciones de alta temperatura requeridas durante el proceso sin perder sus propiedades esenciales, y por ello es empleada como una enzima que propicia la duplicación del ADN. El investigador relata la historia del descubrimiento de la bacteria:

“A partir del otoño de 1966, con el estudiante de pregrado Hudson Freeze, comenzó la obra que iba a conducir al descubrimiento y cultivo de la *T. aquaticus*. Fue a partir de una muestra recogida de seta de la primavera en septiembre 5 1966 que fue aislada *T. aquaticus*. Este cultivo es usado hoy como la fuente de Taq polimerasa para la PCR y es el cultivo especificado en la patente de la polimerasa Taq”. Brock (1997:1208)

⁷⁹ Véase http://www.zeltia.com/info_financiera.cfm?idIdioma=2

A partir de este hallazgo, el profesor Brock logró estudiar zonas térmicas en otras partes del mundo, aislando un número de *T. aquaticus* de otros cultivos, incluso cultivándolo en ambientes artificiales:

“Un cultivo interesante fue aislado del sistema de agua caliente de un edificio en el campus de la Universidad de Indiana. Posteriormente, tuve la oportunidad de demostrar que *T. aquaticus* fuera cultivada en ambientes de agua caliente artificiales, y otros estudios han aislado la *T. aquaticus* a partir de agua caliente en otras partes del mundo” (Brock 1997, 1208).

En el año 1969, en el artículo “*Thermus aquaticus* gen. n. and sp. n., a Nonsporulating Extreme Thermophile” de Brock y Freeze se publicó oficialmente detalles sobre el estudio del organismo:

“Todos los aislamientos [de *T. aquaticus*] forman un pigmento celular amarillo, probablemente un carotenoide... Los estudios nutricionales en una cepa mostraron que no requería vitaminas o aminoácidos, aunque el crecimiento fue considerablemente más rápido en un medio enriquecido que en uno sintético. Varios azúcares y ácidos orgánicos sirven como fuentes de carbono, y, o bien NH_4^+ o glutamato podrían servir como fuente de nitrógeno. El organismo es aerobio estricto y tiene un óptimo de pH de 7,5 a 7,8. La temperatura óptima de crecimiento es 70°, el máximo 79°, y la mínima alrededor de 40°” (Brock y Freeze 1969:289).

Al mismo tiempo, el investigador e inventor David Gelfand de la compañía biotecnológica estadounidense Cetus Corporation tuvo la idea de utilizar un termófilo como fuente de ADN polimerasa para la reacción en cadena de la polimerasa (PCR). Si bien ya existían trabajos previos sobre enzimas termoestable del *T. aquaticus*, Gelfand encontró, probando en todos los cultivos disponibles de la colección de tipos de cultivos americanos (American Type Culture Collection) de, una enzima con las mejores propiedades para la PCR (Brock 1997:1208). En 1989, Gelfand y otros investigadores presentaron la invención del DNA polimerasa aislado a partir de la *thermus aquaticus* y su uso en la PCR en la patente No. 4889818 de Gelfand et al. (1989). De acuerdo con Fore et al. (2006:6) el trabajo de Gelfand y su equipo aumentó la eficacia de la PCR y allanó el camino para que la técnica se convirtiera en un elemento básico en casi todos los laboratorios de biología molecular en el mundo.

Sin embargo, el descubrimiento de la técnica de la PCR se le atribuye a Kary Mullis, químico también investigador de Cetus Corporation, quien ganó el premio Nobel en 1993 por su trabajo sobre PCR. Inicialmente, la técnica consistía en la replicación de cadenas de ADN usando polimerasas que eran destruidas con el calor. Por esta razón, la mejora más importante que realizó Mullis fue usar polimerasas de ADN termoestables, extraídas de la bacteria *T. aquaticus*, denominada taq polimerasa:

“La polimerasa que usamos originalmente era fácilmente destruida por el calor, consecuentemente, más polimerasa debe ser añadida durante cada ciclo de la reacción. El ADN polimerasa de la *Thermus aquaticus*, sin embargo, es estable y activo en altas temperaturas, lo que significa que solo necesita añadir polimerasa al comienzo de la reacción” (Mullis 1990:65).

De esta manera, la relación de dependencia que guarda la tecnología humana de diagnóstico molecular frente a los microorganismos es tan fuerte que la taq polimerasa representa tan solo una enzima más eficiente que las enzimas empleadas con anterioridad (provenientes de la bacteria *E. Coli*) y una alternativa frente a las enzimas incorporadas posteriormente (provenientes de *Pyrococcus furiosus*, *Thermococcus litoralis*; entre otros), con lo cual la bioutilización constituye el componente insustituible en esta técnica.

La revista Science, en el año 1989 se refirió a la PCR como una herramienta de investigación esencial en el mundo de la biología molecular, destacándola como el mayor desarrollo científico del año y apodó las enzimas Taq como “la molécula del año”. Entre las aplicaciones de la PCR se incluyen: pruebas de diagnóstico para la enfermedad de Lyme y el SIDA, detección de hepatitis B, diagnóstico de cáncer, el reconocimiento de mutaciones de genes asociados a enfermedades hereditarias, ciencia forense, determinación de la paternidad, entre otras (Fore et al. 2006:7).

En 1991, Cetus vendió por US\$300 millones de dólares los derechos de uso de sus patentes sobre taq polimerasa y las oportunidades de concesión de licencias a Roche Molecular Systems, una sección de la farmacéutica suiza Hoffmann-La Roche. Según Fore et al. (2006:11) la PCR ha sido una tecnología financieramente exitosa, que a partir de la administración de las patentes y concesiones de licencias ayudó a su difusión por parte de la comunidad científica. Estudios posteriores han aislado otras polimerasas de ADN de otras bacterias termofílicas, tales como la polimerasa Pfu (aislada de *Pyrococcus furiosus*) y polimerasa Tli comercialmente conocida como Vent® de la farmacéutica New England Biolabs (aislada de *Thermococcus litoralis*); que solas o combinadas con la Taq producen una amplificación de alta fidelidad del ADN.

En 2005 las patentes básicas de la técnica PCR expiraron, lo cual redujo las barreras de entrada al mercado. Por lo tanto, es complejo estimar las ventas de la PCR debido al gran número de empresas y distintos productos. La PCR hace parte de las tecnologías que se encuentran en el mercado de diagnóstico molecular. Según un reporte de la empresa Roche, en el año 2012, este mercado estaba valorado en 4 mil millones de dólares (\$4 billion) y crecía a una tasa de 7% anual. Las principales cinco compañías que cubren este mercado son: Roche (32%), Novartis (10%), Gen-Probe (10%), Qiagen (9%) y BD (8%). Refiriéndose particularmente al mercado mundial de los productos de PCR, la compañía de estudios de mercado, BCC Research reportó que este mercado en el 2010 se valoraba en \$ 5 mil millones. En el

mismo año, el segmento de los reactivos y consumibles, al cual pertenece la taq polimeras, representó casi \$ 2.7 mil millones⁸⁰.

9.7. Tecnologías de filtración y desalinización de aguas que incorporan a las acuaporinas naturales.

La relación entre las tecnologías humanas de purificación de agua y desalinización y la tecnología natural de filtración de agua proveniente de las acuaporinas es ilustrativa del proceso de complementariedad que pueden tener los tres procesos de aprendizaje desde el capital natural. Las tecnologías humanas, en este caso, han aprovechado la inspiración ofrecida por estas moléculas transportadoras de agua (bioinspiración), han logrado la transferencia de principios o estrategias desde la naturaleza e igualmente han incorporado las acuaporinas como insumo o componente de la tecnología de filtrado y/o desalinización.

El descubrimiento científico de las acuaporinas y sus funcionalidades básicas es tan importante, que hizo merecedor del premio Nobel de química al investigador Peter Agre en el año de 2003. Las acuaporinas son proteínas que permiten el paso selectivo del agua a través de la membrana de las células, formando un canal en forma de hélice que tiene 0,22 nanómetros de largo por 0,3 nanómetros de ancho con un diámetro de 0,28 nanómetros, que solamente puede ser atravesado por las moléculas de agua. Entre las propiedades de las acuaporinas se cuentan: su capacidad de filtración, calculada en tres mil millones de moléculas de agua por segundo, además de tener características hidrofóbicas e hidrofílicas. Se han descubierto acuaporinas en mamíferos (gatos, perros), vegetales (arroz, tomates), insectos (mosquitos como el Anopheles) y microorganismos, por ejemplo la bacteria E. Coli (Coppo 2008:170).

Como fuente de Bioinspiración, las acuaporinas han inspirado el desarrollo de tecnologías humanas de filtración y desalinización, básicamente a través del conocimiento derivado de su funcionamiento, pues constituyen un sistema de filtración que es capaz de dejar fuera todo tipo de contaminantes o residuos, dejando pasar por su canal exclusivamente al agua, y además por su configuración, pues están anidadas al interior de los tejidos celulares, rodeadas de la membrana celular. La idea de crear membranas de filtración y desalinización que simultáneamente cumplan con las características de bajo consumo energético, gran capacidad de filtración y dar paso selectivo al agua, proviene del conocimiento científico asociado al descubrimiento y comprensión de las acuaporinas y sus procesos de funcionamiento. En tal sentido, los creadores de membranas para filtración de contaminantes y desalinización señalan frecuentemente -a manera de ejemplo puede consultarse la patente de Jensen (2012)- como origen de su reflexión el conocimiento adquirido a partir del trabajo del premio Nobel Peter

⁸⁰ <http://www.bccresearch.com/market-research/biotechnology/polymerase-chain-reaction-markets-bio087a.html>

Agre, quien sugirió que las acuaporinas podrían ser un modelo para el diseño de sistemas de bombeo de agua a escala celular (Agre y Borgnia 1998).

La trayectoria tecnológica que sitúa a las acuaporinas como fuente de procesos de aprendizaje en términos de Biomimética y Bioutilización ha sido claramente descrita y analizada. En una revisión al estado del arte en las tecnologías de desalinización a través de membranas biomiméticas asociadas a las acuaporinas, Tang et al. (2013) dan cuenta de la manera en la que se han presentado estos tres procesos de aprendizaje y de las etapas o secuencia temporal en la que ocurrieron, en el caso de la tecnología de desalinización. En primer lugar, tuvo lugar la inspiración tomada del referente natural y el análisis científico de las propiedades del referente biológico, realizado por W.R Bowen. El siguiente paso consistió en la creación de una membrana de filtración en la que se inserta una capa de acuaporinas Z (conocidas también como AqpZ) provenientes de la bacteria *Escherichia Coli*, las cuales tienen la capacidad de permitir el movimiento de agua por ósmosis (proceso natural de paso del agua a través de la membrana desde una solución más concentrada a una menos concentrada para purificar el agua) y ósmosis inversa (consiste en revertir el proceso natural de ósmosis empleando una fuerza externa, habitualmente presión), el cual es uno de entre diversos diseños de membranas biomiméticas.

En el mismo sentido, Pearce (2012) ha mostrado que existen dos tipos de aproximación a la tecnología biomimética de las membranas para filtración; de una parte, el laboratorio Nacional Sandia, en Nuevo México (USA) ha creado membranas biomiméticas sintéticas construyendo un canal inorgánico que desempeña la misma función selectiva que desempeñan las acuaporinas naturales. De otra parte, la membrana diseñada por la empresa Danesa Aquaporin, que actualmente se encuentra en etapa de desarrollo para salir al mercado, imita la estructura de la pared celular, conformando una capa lipídica doble, en la cual se incrustan las acuaporinas naturales.

En este caso, además del diseño biomimético, las acuaporinas desempeñan una función en la membrana de filtración, lo cual constituye un ejemplo de Bioutilización, descrito plenamente en un estudio del Instituto Danés de Hidráulica Aplicada (2014) -DHI-sobre el mejoramiento de la desalinización de agua con acuaporinas, en el que se cuenta con la colaboración entre el programa de Agua y medioambiente de Singapur (EWI), la Universidad Tecnológica de Nanyang (NTU) y la compañía Danesa Aquaporin, e ilustra claramente la bioutilización en el caso de las acuaporinas como elemento incorporado o incrustado en la tecnología de purificación y desalinización de aguas mediante membranas biomiméticas:

“La comprensión de las acuaporinas y su rol en la vida ha abierto la posibilidad de usar a las acuaporinas en un contexto industrial. Mediante la imitación de las membranas de las células vivas que contienen a las acuaporinas, pueden desarrollarse membranas sintéticas similares. En primer lugar, los canales de la acuaporina son incorporados dentro de “celdas” a manera de conchas esféricas (vesículos) que después son totalmente incrustadas en una película delgada de

polímero. Esa capa activa rica en acuaporina puede tener las propiedades de transporte ideales para aplicaciones de reutilización y desalinización del agua” (DHI 2014:1)

9.8. El poliaspartato, un biopolímero natural derivado de las ostras.

La historia del Poliaspartato, un biopolímero natural derivado de las ostras, se remonta a los trabajos pioneros realizados por un equipo del laboratorio de la facultad de ciencias biológicas de la Universidad de Clemson dirigido por el Dr. Alfred Wheeler. Sus investigaciones sobre el crecimiento de la concha de las ostras, desarrolladas desde 1975, permitieron encontrar que existe una proteína que inhibe, de manera natural, el crecimiento del carbonato de calcio, lo cual incide en la formación de su caparazón. El equipo reportó en 1981 sus descubrimientos en un artículo publicado en la revista Science, mostrando que una proteína al interior de las ostras es el agente responsable de la regulación del crecimiento de la concha, inhibiendo el crecimiento del carbonato de calcio, un biomineral que representa un porcentaje muy alto del material del que está compuesta la concha:

“Una proteína soluble que fija el calcio extraída de concha de ostra suprime la nucleación de carbonato de calcio y disminuye la tasa de crecimiento de los cristales in vitro. Estos hallazgos sugieren que la matriz soluble puede regular el crecimiento de la concha” (Wheeler et al. 1981:1397).

El desarrollo definitivo del poliaspartato como polímero biológico que puede sustituir a polímeros sintéticos no biodegradables –como el poliacrilato- se debe a los trabajos de el científico Larry Koskan, creador de la compañía Donlar (actualmente llamada Nanochem Biopolymers la cual se ha dedicado desde su origen en 1990 a la manufactura y comercialización del poliaspartato, proteína empleada como insumo en la fabricación de polímeros. Esa Compañía, desarrollo un proceso de producción, soportado por varias patentes (Koskan et al. 1993, Ross et al. 1997 y Patil et al. 2011), el cual ha permitido su comercialización para diferentes usos industriales y productivos – Producción de Petróleo, Tratamiento de Agua Industrial, Minería, Textiles, Recubrimientos, Productos de aseo y cuidado personal, entre otros-.

El desarrollo de este método de producción puede considerarse un ejemplo de bioinspiración puesto que la idea de usar esa proteína –poliaspartato- en la fabricación de polímeros biodegradables fue tomada a partir del conocimiento de los trabajos del equipo liderado por el profesor Wheeler en los que se muestra el rol desempeñado por las proteínas en la inhibición del crecimiento del carbonato de calcio como material constituyente de la concha de las ostras. Tal y como se queda de presente en el testimonio rendido por Larry Koskan al Comité de biotecnología marina de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos en 1993⁸¹:

⁸¹ Véase el testimonio de Koskan en el congreso de los Estados Unidos http://archive.org/stream/marinebiotechnol00unit/marinebiotechnol00unit_djvu.txt

“La Corporación Donlar fue formada en Enero 8 de 1990. Con el objetivo de fabricar y comercializar una proteína conocida como poliaspartato biodegradable para hacer frente a la necesidad de no contaminante, no tóxico y polímeros solubles en agua, ambientalmente seguros. Para 1993, Donlar había desarrollado varias patentes que cubren los procesos, la composición y el uso final de poliaspartato que juntos tienen el potencial de reemplazar al menos mil millones de libras de productos químicos no biodegradables que se venden en todo el mundo cada año. La idea original que me llevó a formar Donlar surgió de mi contacto inicial con dos biólogos marinos, el Dr. Wheeler de la Universidad de Clemson y el Dr. Sikes de la Universidad del Sur de Alabama. Los Drs. Wheeler y Sikes iniciaron su trabajo en 1981, con fondos de la Fundación Nacional de Ciencias y el Programa de Colegio Nacional de Sea Grant, donde se determinó que los biopolímeros que se encuentran en conchas de ostras contienen proteínas que imitan el comportamiento de ciertos polímeros sintéticos conocidos como poliacrilatos”

Este caso ilustra en el desarrollo de tres etapas, lo siguiente:

En primer lugar, a partir del trabajo de Wheeler y su equipo se puede verificar que la tecnología natural de uso de un polímero natural para inhibir el crecimiento de un biomineral es análoga a la tecnología humana, la cual emplea polímeros sintéticos en la inhibición del crecimiento de procesos tales como la corrosión (inicio de los años 1980's). Lo que indica un desarrollo en paralelo de tecnologías natural y humana, que representan soluciones análogas.

En segundo lugar, Larry Koskan y su equipo de trabajo en la compañía Dorlan desarrollan un proceso de producción de una proteína biodegradable denominada poliaspartato, en la que se presenta un proceso de bioinspiración a partir del conocimiento de los mecanismos empleados por las ostras para inhibir y regular su crecimiento, descubiertos por el Dr. Wheeler y su equipo. En tercer lugar, se presenta la adopción del modelo de la tecnología natural, estudiado por el equipo liderado por el Dr. Wheeler desde el inicio de los años 80's para su aplicación en la producción de polímeros comerciales. En el año 1999, Wheeler y Sikes publican su artículo proteínas de las ostras, en el que presentan su análisis para la síntesis y comercialización de polímeros basados en la estructura y actividades de las proteínas de las ostras (proteins from oyster). Basado en este análisis, el propio Dr. Sikes fundó la compañía Aquero para el desarrollo y comercialización de biopolímeros, orientados al uso en productos para el tratamiento de aguas y productos agrícolas entre otros. El profesor Sikes señala que el intento de introducir estos productos en el mercado como competencia de los polímeros sintéticos ha sido aún limitado puesto que no tienen la capacidad de competir en términos de costos y la escala de producción siguen siendo insuficiente.

En conclusión las etapas de desarrollo de los biopolímeros, muestran que las tecnologías naturales y humanas pueden desarrollarse paralelamente y pueden resolver un problema análogo; que la bioinspiración es una fuente de la idea en la

que se basa la tecnología humana de biopolímeros, la cual surge del conocimiento de la tecnología natural desarrollada por las ostras marinas; biomimética, en tanto se toman la estructura y actividades de las proteínas de las ostras como modelo natural en el que se basan métodos de producción humanos y finalmente, se presenta la bioutilización puesto que el insumo básico es una proteína natural.

9.9. El monstruo de gila como fuente para el control de la diabetes: Byetta® exenatide injection

La empresa biotecnológica de San Diego, Amylin Pharmaceuticals, Inc. produce Byetta un medicamento inyectable para el control de los niveles de azúcar en pacientes adultos con diabetes mellitus (tipo 2). La página oficial del medicamento explica cómo funciona Byetta⁸²:

“Después de una comida, los niveles de azúcar en la sangre se elevan, a menudo demasiado alto. Byetta ralentiza la tasa a la cual la glucosa entra en el torrente sanguíneo. Byetta le señala al páncreas la cantidad correcta de producción de insulina en el momento adecuado para ayudar a que el azúcar en la sangre se mantenga cerca al nivel normal. Después de que los niveles de azúcar en la sangre caen, Byetta le señala al páncreas que detenga la producción de la insulina. Este efecto ayuda al cuerpo a evitar la baja de azúcar en la sangre, también (se llama hipoglicemia)”.

El creador de Byetta es el médico e investigador John Eng, quien en la década de 1980, encontró en estudios realizados por los gastroenterólogos Raufman et al. en 1981 y 1982, que el veneno del monstruo de Gila (*Heloderma suspectum*) estimulaba la secreción de enzimas pancreáticas in vitro, en la patente Eng (1995). A partir del veneno del monstruo de gila, se produjeron varios péptidos usados para la estimulación de la producción de Adenosín monofosfato cíclico - (siglas en inglés cAMP) y la liberación de amilasa desde las células pancreáticas acinares dispersas.

Basado en estos estudios, en 1992 el Dr. Eng aisló el veneno de otro lagarto, el moteado mexicano o enchaquirado (*Heloderma horridum*), extrayendo un compuesto que denominó la exendina-3, el cual tiene características similares a la hormona humana glucagón tipo 1 (GLP- 1) que estimula la secreción de insulina del páncreas solo cuando el azúcar en la sangre es alto pero cuando los niveles de azúcar en la sangre son normales, el GLP-1 no estimula la insulina -la hormona que ayuda a las células a procesar los azúcares en la sangre- (Eng et al. 1992).

Posteriormente, el Dr. Eng examinó nuevamente el veneno del *Heloderma suspectum* y mediante la purificación del mismo, obtuvo otro péptido. Este péptido llamado exendina-4 es un análogo de exendina-3. La compañía Amylin Pharmaceuticals estaba desarrollando investigaciones de hormonas peptídicas y tenía experiencia con el GLP-1, y fue autorizada en 1996 por el el Dr. Eng para aplicar su descubrimiento. Actualmente, Amylin Pharmaceuticals produce Byetta como marca comercial de la exendina.

⁸² Véase <http://www.byetta.com>

En el año 2005, la droga Byetta fue aprobada y posteriormente, en 2012, la FDA aprobó una inyección de exenatide semanal llamada Bydureon®, la cual es una versión de Byetta de mayor duración. Para la empresa farmacéutica Amylin (adquirida en 2012 por Bristol-Myers Squibb), Byetta genera la mayor parte de las ventas anuales, por ejemplo en el año 2011 representó \$ 518 millones (83%) de \$621 millones de ventas netas⁸³. En cuanto a Bydureon® una vez salió al mercado, en el primer trimestre generó ingresos por \$6,9 millones⁸⁴. En el año 2012, el Bydureon® alcanzó ventas anuales por \$52 millones de dólares mientras que las ventas globales de Byetta fueron de \$85 millones de dólares (el 98% de estas ventas fueron en Estados Unidos)⁸⁵. En el año 2013, la empresa farmacéutica global AstraZeneca (AZ), adquiere la cartera de productos de la diabetes de Bristol-Myers Squibb, entre ellos: Byetta y Bydureon®.

Muchos científicos han estudiado la incretina y la utilidad clínica de la exenatide (comercialmente conocido como Byetta) como agente para el tratamiento de pacientes con diabetes mellitus tipo 2, por ejemplo: Bond (2006), Triplitt y Chiquette (2006), Tushuizen et al. (2006) y Cvetković y Plosker (2007). Estos investigadores y otros coinciden en que la exenatide es una incretina mimética. Triplitt y Chiquette (2006) explican que la exenatide es una forma sintética⁸⁶ de una proteína, la incretina, que se encuentra en la saliva del monstruo de Gila importante en la homeostasis de la glucosa. Cvetković y Plosker (2007) señalan que exenatide (Byetta) es una variedad sintética, mimética de la incretina, un péptido glucorregulador aprobado en los Estados Unidos y Europa. Tushuizen et al. (2006) señalan que la exenatide como una incretina mimética que ayuda a pacientes con diabetes tipo 2 en la acumulación de grasa no alcohólica en el hígado (esteatosis hepática).

Por su parte, Bond (2006) también indica el origen bioinspirado y posteriormente biomimético de este fármaco. El autor manifiesta que exenatide es la versión sintética de la exendina-4, una hormona (la incretina) originalmente encontrada en la saliva de la monstruo Gila y que su importancia radica en que actúa con una estructura similar a la hormona natural GLP-1 que se libera desde el tracto gastrointestinal y mejora la respuesta de insulina. Incluso, la Administración de Alimentos y Drogas de Estados Unidos (FDA) clasifica a la exenatide y otros fármacos (liraglutide, sitagliptin, alogliptin, saxagliptin y linagliptin) con el calificativo de drogas miméticas de la incretina, señalando que estas drogas

⁸³ Véase <http://www.drugwatch.com/byetta/>

⁸⁴ Véase <http://www.pharmpro.com/news/2012/07/bristol-myers-squibb-astrazeneca-look-increase-sales-bydureon>

⁸⁵ Véase <http://news.bms.com/press-release/financial-news/bristol-myers-squibb-reports-first-quarter-2013-financial-results>

⁸⁶ Se dice que un producto es sintético si es obtenido por procedimientos industriales, generalmente una síntesis química, que reproduce la composición y propiedades de algunos cuerpos naturales (RAE).

funcionan imitando las hormonas de la incretina en el cuerpo, las cuales estimulan naturalmente la liberación de insulina en respuesta a la comida⁸⁷.

En cuanto a la copia de la naturaleza, la corporación estadounidense WebMD que ofrece información en servicios de salud, explica que la incretina mimética actúa como las incretinas en el cuerpo en tres acciones: (1) ordena al páncreas liberar insulina cuando el azúcar en la sangre se eleva, (2) evita que el páncreas produzca demasiado glucagón (hormona que hace que el hígado libere su azúcar almacenada en el torrente sanguíneo) y (3) ayuda a disminuir la velocidad a la que su estómago se vacía después de comer⁸⁸. Es decir que, en el caso de Byetta, este medicamento involucra la bioutilización es secundaria porque conlleva a la producción de compuestos semisintéticos o sintéticos con propiedades análogas a las del compuesto biológico.

9.10. Biorremediación utilizando una película de bacterias: el Bio-dome

Una de las aplicaciones tecnológicas más importantes en el campo de la bio - remediación es el “Bio-dome”, una tecnología de descontaminación en la que se combinan dispositivos que adoptan la forma geométrica de una cúpula que aloja una bio-película formada por bacterias. Esta tecnología permite la conformación de un sistema de varios domos dispuestos de forma concéntrica a los cuales se les inyecta aire a baja presión que permite acelerar el crecimiento de las bacterias que realizan el trabajo de descontaminación. Estos dispositivos pueden situarse en la superficie o sumergidos en el agua a descontaminar. Las bacterias descontaminantes actúan sobre los factores de contaminación reduciendo la demanda bioquímica de oxígeno, los sólidos suspendidos totales, el amoníaco y el nitrógeno, presentes habitualmente en las lagunas de aguas residuales. El equipo de científicos que creó y desarrollo estas bio-cúpulas fue liderado por el Doctor Kraig Johnson, profesor de ingeniería civil y ambiental en la Universidad Utah, y la empresa Wastewater Compliance Systems obtuvo la licencia exclusiva para la comercialización de esta tecnología, denominada inicialmente como “Poo-Gloo” - dado el parecido de los bio-domos con los Iglús esquimales-.

Técnicamente, el domo desarrollado por el equipo de la universidad de Utah, genera las condiciones para que el proceso biogeoquímico de nitrificación en el que intervienen las bacterias se realice de manera óptima, para que se produzca la bio-remediación natural de las aguas contaminadas, y ha sido clasificado como un sistema comercial para la nitrificación de lagunas (Crites et al. 2014:179).

La estrategia de esta tecnología es la creación de condiciones y ambientes apropiados (óptimos) para que la actividad biológica de las poblaciones de bacterias se mantenga y pueda desarrollarse. Tales condiciones, esencialmente, están

⁸⁷ Véase <http://www.fda.gov/Drugs/DrugSafety/InformationbyDrugClass/ucm343516.htm>

⁸⁸ Véase <http://www.webmd.com/diabetes/incretin-mimetics-for-type-2-diabetes>

representadas por la combinación de ventilación suficiente y la disponibilidad de zonas para el crecimiento de una película de bacterias (biopelícula). La ventilación óptima permite a las bacterias descontaminantes contar con los niveles de oxígeno óptimos para su reproducción; y la formación de una lámina o película estable de bacterias da la oportunidad a las poblaciones bacterianas de superar los factores adversos para su crecimiento (las bajas temperaturas y la densidad alcanzada por los residuos). El diseño técnico de las bio-cúpulas demanda poca oxigenación y con ello, una menor cantidad de energía (los test han mostrado que se requiere un tercio) que la requerida por otros sistemas de mantenimiento de niveles de oxígeno. Los bio-domos producen el equivalente de 2,800 pies cuadrados de superficie disponible, estimulando la concentración de bacterias en un ambiente protegido, oscuro y oxigenado que desestimula la competencia que las algas representan para las bacterias. Las pruebas realizadas a la tecnología del bio-domo mostraron que la estructura provista por el domo, sumada al suministro de oxígeno, efectivamente mejoraron el desempeño de la bio-película bacteriana (Choi *et.al* 2007).

La idea de utilizar el poder descontaminador de las poblaciones de bacterias en los procesos de descontaminación ha sido descrita por el Dr. Craig Johnson, en declaraciones hechas al canal de televisión KSL:

"Lo llamamos Poo Gloos... No sé por qué alguien no pensó en esto ya. Es elegante en su simplicidad... La idea es dar a las bacterias una gran área de superficie para crecer, abundancia de oxígeno, y un ambiente oscuro para impedir el crecimiento de algas... Si usted puede detener el crecimiento de algas y mejorar las bacterias, a continuación, los contaminantes son removidos por las bacterias." (Hollenhorst 2008).

Los problemas de contaminación de las lagunas de aguas residuales han sido descritos por los creadores de los bio-domos de la siguiente manera: las lagunas a las que son arrojados los desechos no son capaces de reducir los niveles de nitrógeno a sus niveles óptimos por lo que alcanzan niveles altos de nitrógeno amoniacal que resultan tóxicos para los organismos acuáticos. Adicionalmente, el nitrógeno estimula el crecimiento de algas, lo que causa la eutroficación (crecimiento desbordado de nutrientes) de las aguas servidas (Johnson 2010).

La reducción biológica del nitrógeno amoniacal es realizada de manera natural por las poblaciones de bacterias de los géneros nitrobacter y nitrosomonas, las cuales requieren de grandes cantidades de oxígeno. La tecnología del bio-domo básicamente provee un ambiente favorable para el crecimiento de una bio-capa bacteriana, proveyendo las cantidades de oxígeno adecuadas y promoviendo el proceso de desnitrificación que finalmente permite a las poblaciones de bacterias ganar la competencia a las poblaciones de algas, generando descontaminación.

Las bacterias del género *nitrobacter* y *nitrosomonas* desempeñan una labor importante en el ciclo del nitrógeno, del cual hace parte la nitrificación, un proceso de oxidación a través del cual las plantas asimilan el nitrógeno en forma de nitratos y amonio, pero sólo pueden hacerlo una vez que poblaciones de bacterias de los géneros *nitrobacter* y *nitrosomonas* convierten el nitrógeno molecular disponible en la atmósfera, en nitrógeno útil. Este proceso se conoce como nitrificación y fundamentalmente es un proceso de oxidación en el cual el nitrógeno pierde gran cantidad de su energía química disponible (Madigan et al. 2004).

Desde el punto de vista de su fundamentación técnica, los bio-dome han sido descritos mediante modelos matemáticos de dos ecuaciones diferenciales que representan la dinámica de bacterias autótrofas (producen las sustancias esenciales para su metabolismo a partir del dióxido de carbono) y heterótrofas (se alimentan con sustancias orgánicas sintetizadas por otros organismos) que permitieron comprender los factores que influyen en la conformación de la bio-película (Choi et al. 2010); descrita también en la patente No. 8764986 de Johnson et al. (2014).

CAPÍTULO X

Política Económica E Instrumentos Para La Sostenibilidad De Los Sistemas Híbridos De Innovación: Un Análisis De Dinámica No Lineal

10. Política Económica E Instrumentos Para La Sostenibilidad De Los Sistemas Híbridos De Innovación: Un Análisis De Dinámica No Lineal

Una vez hemos formulado las dimensiones de comportamiento individual y agregado de los sistemas híbridos de innovación, en este capítulo modelaremos procesos económicos en los que están involucradas las tecnologías naturales, con el propósito de estudiar la necesidad (o no) de aplicar algún tipo de política económica, conducente al mantenimiento de las capacidades de ofrecer bienes y servicios aprovechables en los procesos de producción e innovación que tiene el capital natural. Teniendo en cuenta el aprovechamiento humano de las tecnologías (o bienes y servicios) provenientes de la naturaleza, exploraremos las circunstancias bajo las cuales podría ser necesaria la aplicación de la política económica, y finalmente, en el capítulo final (Capítulo 11) consideraremos el conjunto de instrumentos específicos que podrían ser aplicados en la gestión de los sistemas híbridos de innovación.

Hasta este punto de nuestra argumentación, hemos mostrado diversos aspectos del proceso de interacción económica a partir del cual el sistema económico humano aprovecha los avances tecnológicos generados por los ecosistemas. Estamos refiriéndonos, entonces, a un proceso de intercambio permanente entre dos sistemas complejos (natural, económico) que evolucionan en el tiempo; es decir, de un proceso que es –esencialmente- dinámico y complejo.

Es por ello que utilizaremos algunos recursos de modelización dinámica para el análisis de algunos de los principales puntos que hemos estado proponiendo, concentrándonos en tres aspectos.

En primer lugar, la caracterización del comportamiento de los agentes económicos naturales como optimizadores y el reconocimiento de la existencia de un espacio de interacción económica entre los agentes naturales y los agentes económicos humanos (un sistema de “Innovación Natural”), en segundo, una descripción de los procesos de cambio tecnológico que dan lugar al surgimiento del “Aprendizaje del Capital Natural”, y en tercer lugar, los agentes naturales producen bienes y servicios que tienen valor económico y por lo tanto pueden evaluarse situaciones en las cuales estos puedan tener derechos de propiedad y puedan, además, recibir algún tipo de retribución por su contribución.

10.1. Un modelo de Aprendizaje Del Capital Natural En Un Sistema Híbrido De Innovación

Una profunda reflexión acerca de la caracterización de la naturaleza como un agente económico, o como un conjunto de agentes económicos, puede encontrarse en Nuppenau (2002). Es posible tipificar el comportamiento de un agente económico natural en un contexto en el que se asume un comportamiento “optimizador” por parte de los mismos. El trabajo de Nuppenau constituye una referencia importante que permite precisar condiciones comportamentales de los agentes participantes en la interacción que define al sistema híbrido de innovación; y permite afirmar que pueden caracterizarse los agentes económicos naturales, la relación de intercambio entre éstos y los agentes económicos naturales, en un contexto en el que los agentes económico naturales son el participante pasivo (el “agente”) y los segundos el participante activo (el “principal”), quien controla el proceso. En este marco conceptual, pueden establecerse condiciones bajo las cuales el intercambio entre los agentes económicos naturales y los agentes económicos humanos se realiza e igualmente es viable especificar una función de producción, una función objetivo y una restricción económica de escasez para los agentes naturales. Considerando que el objetivo económico del agente natural es alcanzar mayores niveles de aptitud, y la diversidad biológica es un medio para alcanzarlos, puede construirse la función objetivo de los agentes naturales; y las condiciones de intercambio se refieren a una situación en la que el agente humano beneficia a algunas especies naturales, incrementando su aptitud, y esta relación permite un intercambio en el que el agente natural ofrece ciertos recursos (tecnologías naturales, por ejemplo) y el humano ofrece otros (por ejemplo abono, protección, nutrientes). Tal y como lo demuestra Nuppenau, existen, pues unos “términos de intercambio” en los que el agente natural ofrece un producto a cambio de otro producto ofrecido por el agente humano.

El intercambio, tal y como está siendo expresado, implica que el humano debe retribuir al agente natural su aporte si desea mantener el servicio que éste le presta (en este caso un servicio de naturaleza tecnológica). Esta disposición a pagar –de parte de los humanos- por los servicios que ofrece la naturaleza es un indicador de la existencia de valores marginales, además de establecer la base para pensar en la existencia de un derecho de propiedad del agente natural. Desde el punto de vista del agente natural, puede decirse que su proceso de interacción implica una renuncia voluntaria de recursos (por ejemplo una tecnología natural) que puede ser objeto de intercambio, para su beneficio (aptitud), a cambio de pagos o retribuciones (trabajo, nutrientes, por ejemplo).

Tabla 21. Comparación entre agentes económicos naturales y humanos.

AGENTE	AGENTE NATURAL	AGENTE HUMANO
Restricción	Escasez	Escasez
Propiedad	Tierra, Hábitats	Fuerza de trabajo
Tipo Valor	Funcional	Humano
Regla De Comportamiento	Maximización (Función Objetivo)	Maximización (Función de Utilidad)
Parámetro Básico	Aptitud	Utilidad
Argumento(s)	Biomasa – Biodiversidad	Consumo
Variables Positivas	Desempeño, Función, Aptitud	Bien, Servicio
Variables Normativas	Aptitud, Funcionamiento, Bienestar	Utilidad, Bienestar
Incentivos – Valores de intercambio	Precio de la Tierra (Costo de Oportunidad Natural)	Salario
Ganancias del Intercambio	Obtención Más recursos para conseguir mejor desempeño, mayor Aptitud	Obtención de recursos naturales, tecnologías naturales, Soporte vital, etc.
Medio De Intercambio	Materia Orgánica	Materia Orgánica

Fuente: Elaboración del autor, basado en Nuppenau (2002).

10.1.1 Tecnologías Naturales Y Coeficientes Técnicos De Producción Natural

Asumiendo el hecho de que los ecosistemas son útiles para el desarrollo de las actividades económicas humanas, puede decirse que existe una matriz de interacciones entre el ecosistema y el sistema económico:

Tabla 22. Matriz de interacción económica entre sistemas natural y económico.

MATRIZ DE INTERACCIÓN ECONÓMICA	ACTIVIDADES ECONÓMICA	ACTIVIDADES ECOLÓGICAS
Bienes Económicos	Interacciones Puramente Económicas	Interacciones Ecosistemas –Sistema Económico Interacciones-
Bienes naturales	Interacciones Sistema Económico –Ecosistemas-	Interacciones Puramente Ecológicas

Fuente: Elaboración del Autor

Sobre la base del modelo desarrollado por Wei Bin Zhang (1990) que relaciona el crecimiento económico con procesos de aprendizaje, podemos ilustrar o

especificar la manera en la que la interacción entre dos sectores (natural y humano) conforma el “sistema híbrido de innovación”.

Para empezar, tenemos:

Z_{ij} : Flujo de i mercancías naturales (tecnologías) que van al sector económico j , medido en unidades físicas.

X_j : Valor Bruto de Producción en el sector Económico j , medido en unidades monetarias.

El correspondiente coeficiente técnico de producción definido para este proceso de interacción económica es:

$$\frac{Z_{ij}}{X_j} = a_{ij}$$

Es el coeficiente técnico que representa la relación existente entre el i -ésimo input proveniente del ecosistema –medido en unidades físicas- y el j -ésimo sector económico –medido en términos del medio de cambio (moneda)-.

Podemos hablar de un sistema híbrido como aquel que está compuesto por la interacción entre dos sectores productivos; un sector económico natural, proveedor de bienes y servicios naturales (tecnologías naturales y servicios ecosistémicos, entre otros) y un sector económico humano productor de bienes (y servicios).

10.1.2. Procesos De Aprendizaje Del Capital Natural En Un Sistema Input - Output

El análisis de la interacción entre los ecosistemas y el sistema económico, puede ser analizado a partir de un modelo de Input – Output dinámico siguiendo el planteamiento hecho al respecto por Zhang (1990). En este contexto, el sistema económico –del tipo Leontief- está compuesto por n sectores que producen cada uno un bien o servicio diferente.

En general, puede decirse que existen:

$A \equiv [a_{ij}]$ Una matriz de coeficientes Input-output que es no singular y no negativa,

a_{ij} Coeficiente de Output i utilizado por unidad del bien j , con $0 \leq a_{ij} < 1$.

$B \equiv [b_{ij}]$ Una matriz que es no singular y no negativa, en la que los b_{ij} son los coeficientes de output i necesario para producir una unidad de capacidad j , con $0 \leq b_{ij} < 1$, ($i, j = 1, 2, \dots, n$).

Tenemos, pues, una demanda intermedia, una demanda por inversión y un objetivo de consumo o demanda final:

A_x : Demanda intermedia

B_x : Demanda por inversión

C : Objetivo de consumo

Con estos elementos, constituimos una estructura de producción:

$$\dot{x}(t) = A_x x(t) + B \dot{x}(t) + c$$

Que puede expresarse como sistema de n ecuaciones de primer orden con coeficientes constantes:

$$\dot{x} = B^{-1}(I - A)x - B^{-1}c$$

Teniendo en cuenta que $x(0) = x_0$

Su solución viene dada por (ver Zhang 1990):

$$x(t) = e^{B^{-1}(I-A)t}(x_0 - x_e) + x_e$$

$$x(t) = P e^t P^{-1}(x_0 - x_e) + x_e$$

Que contiene a los valores propios o autovalores.

Para un sistema dinámico de Leontief abierto, como este, tenemos un sistema de precios dado por la expresión:

$$p = pA + rpB - \dot{p}B + wa_0$$

El vector de precios incluye Costos, Costos de interés, con una tasa de interés r , Ganancias (pérdidas) de capital, Costos laborales.

La dinámica de precios, pues, viene dada por:

$$\dot{p} = -p(I - A - rB)B^{-1} + wa_0B^{-1}$$

Que tiene autovalores negativos y una solución que tiende a:

$$p = wa_0(I - A - rB)B^{-1}$$

Este sistema general puede ser especificado para dar cabida a la distinción entre sectores productores de conocimientos y sectores productores de capital, con el propósito de analizar el cambio técnico debido a procesos de aprendizaje del capital natural. Suponemos una economía con sectores de dos tipos:

- Sectores de producción natural (por ejemplo, ecosistemas) y sectores de producción humana (n sectores).
- Sectores Productores de Capital Natural (m Ecosistemas), que producen Conocimientos Naturales, N
- Sectores Productores de Capital Físico, que producen “Máquinas”, K

Tenemos, pues, una economía con n sectores económicos humanos y m sectores económicos naturales.

Output del Sector Económico Humano i -ésimo: X_{0i} ($i = 1, \dots, n$)

Output del Sector Económico Natural j -ésimo: X_{1j} ($j = 1, \dots, m$)

$$\begin{aligned} X_0 &= (X_{01}, \dots, X_{0n})^T \\ X_1 &= (X_{11}, \dots, X_{1m})^T \\ X_0 &= (X_{0i}, \dots, X_{0n}, X_{11}, \dots, X_{1m})^T, \end{aligned}$$

Con lo que el producto total en el i -ésimo sector económico humano está dado por:

Estructura de Producción en el i -ésimo Sector Económico Humano

$$X_{0i} = \sum_{k=1}^n a_{ik}X_{0k} + \sum_{k=1}^n b_{ik}dX_{0k}/dt$$

$$\sum_{q=1}^m c_{iq}X_{1q} + \sum_{q=1}^m d_{iq}dX_{1q}/dt + E_{0i} \quad (i = 1, \dots, n)$$

E_{0i} : Demanda final del i-ésimo sector económico humano.

a_{ik} Coeficiente de input interno (Para producir una unidad del bien k -ésimo en el sector económico humano, se necesitan a_{ik} unidades del bien i -ésimo en el sector económico humano como input).

c_{iq} Coeficiente de input externo (para producir una unidad del q -ésimo bien en el sector económico natural, se requieren c_{iq} unidades del i -ésimo bien provenientes del sector económico humano. Es decir, la producción en el sector natural requiere de ciertos inputs provenientes de los sectores humanos (en nuestro caso, por ejemplo, fertilizantes).

b_{ik} Coeficiente que mide la cantidad de output del i -ésimo sector económico humano que es necesaria para ser invertida en el propio sector para obtener un incremento de capacidad (en una unidad adicional).

d_{iq} Coeficiente que mide la cantidad de output del i -ésimo sector económico humano que es necesaria para ser invertida en el sector económico natural, para obtener un incremento de capacidad (en una unidad adicional).

La estructura de producción en el sector económico humano, puede entonces expresarse como:

$X_0 = a_0 X_0 + b_0 dX_0/dt + c_0 X_1 + d_0 dX_1/dt + C_0$, en donde:

$$a_0 = (a_{ik})_{n \times n}$$

$$b_0 = (b_{ik})_{n \times n}$$

$$c_0 = (c_{iq})_{n \times n}$$

$$d_0 = (d_{iq})_{n \times n}$$

Estructura de Producción en el j -ésimo Sector Económico Natural:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{jk} X_{0k} + \sum_{k=1}^n b_{jk} dX_{0k}/dt$$

$$\sum_{q=1}^m c_{jq} X_{1q} + \sum_{q=1}^m d_{jq} dX_{1q}/dt + E_{1j} \quad (i = 1, \dots, n)$$

Donde:

E_{1j} : Demanda final del j-ésimo sector económico humano.

a_{jk} : Coeficiente de input interno (Para producir una unidad del bien k-ésimo en el sector económico natural, se necesitan a_{jk} unidades del bien j-ésimo en el sector económico natural como input).

c_{jq} : Coeficiente de de input externo (Para producir una unidad del q-ésimo bien en el sector económico humano, se requieren a_{jk} unidades del j-ésimo bien provenientes del sector económico natural. Es decir, la producción en el sector humano, requiere de ciertos inputs provenientes de los sectores naturales (en nuestro caso, por ejemplo, naturfactos).

b_{jk} : Coeficiente que mide la cantidad de output del j-ésimo sector económico natural que es necesaria para ser invertida en el propio sector para obtener un incremento de capacidad (en una unidad adicional).

d_{jq} : Coeficiente que mide la cantidad de output del j-ésimo sector económico natural que es necesaria para ser invertida en el sector económico humano, para obtener un incremento de capacidad (en una unidad adicional).

La estructura de producción en el sector económico natural, puede entonces expresarse como:

$$X_0 = a_1 X_0 + b_1 dX_0/dt + c_1 X_1 + d_1 dX_1/dt + C_0,$$

En donde:

$$a_1 = (a_{jk})_{n \times m}$$

$$b_1 = (b_{jk})_{n \times m}$$

$$c_1 = (c_{jq})_{m \times m}$$

$$d_1 = (d_{jq})_{m \times m}$$

La estructura que representa al sistema económico integrado puede expresarse como:

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & c_0 \\ a_1 & c_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 & d_0 \\ b_1 & d_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX_0/dt \\ dX_1/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \end{bmatrix}$$

Es decir,

$$\dot{X} = A_c X + B_d \dot{X} + E,$$

Es el sistema general definido antes.

Respecto del cambio técnico, se asume, en el contexto de este modelo, como el cambio o la modificación en las relaciones entre inputs y outputs, o sea, cambios en los coeficientes tecnológicos. En nuestro caso, analizaremos el cambio técnico endógeno, en el sentido de que éste dependerá solo de las variables internas del sistema económico híbrido descrito. En esta economía, el progreso tecnológico del sector económico humano, depende del crecimiento en los conocimientos en el sector económico natural.

10.1.3. El Aprendizaje del Capital Natural y el cambio técnico

En este tipo de procesos, el cambio técnico en los sectores económicos humanos, depende de la producción en los sectores económicos naturales. Entonces, nuestra aproximación a la modelación de los procesos de aprendizaje del capital natural consiste en dos tipos de procesos relacionados: de un lado, los agentes humanos crean nuevos bienes de capital, y acumulan su experiencia productiva (Aprendizaje por la Práctica); del otro, el incremento en conocimientos acumulado por los agentes naturales, produce mejoras en la eficiencia técnica del sector económico humano. La evolución temporal de los coeficientes de input e inversión (internos y externos), depende de variables internas del sistema descrito.

$$\dot{a}_{ik} = A_{ik}(X_{0k}, a_{ik})$$

$$\dot{b}_{ik} = B_{ik}(X_{0k}, b_{iq})$$

$$\dot{c}_{iq} = C_{iq}(X_{1q}, c_{iq})$$

$$\dot{d}_{iq} = D_{iq}(X_{1q}, d_{iq})$$

Puede decirse que esta economía experimenta cambio técnico inducido por procesos de aprendizaje –en el sector económico humano– que a su vez están relacionados con incrementos en el conocimiento proveniente del capital natural. Podemos, pues, pensar en un sistema de producción en el que los trabajadores crean nuevos bienes y servicios gracias a procesos de aprendizaje en los que aprovechan el conocimiento tecnológico que pueden obtener del stock acumulados por los agentes naturales.

Como puede observarse, estamos en presencia de un proceso dinámico en el que, dado un stock de capital natural, se produce un flujo permanente de conocimientos desde el sector económico natural, y esto es –como hemos

señalado antes- una definición de “Aprendizaje desde el Capital Natural”, puesto que este proceso consiste en el aprovechamiento económico de un flujo de conocimientos proveniente del stock de capital natural.

Las tecnologías naturales (naturfactos) tienen valor porque son escasos (su provisión depende de relaciones ecosistémicas) y además ofrecen un beneficio al sistema económico humano contribuyendo en el proceso de cambio técnico. Una vez descrito el tipo de interacción que se produce, en términos de conocimientos y aprendizaje- o entre los sistemas económicos humano y natural, es necesario abordar un análisis de política económica.

10.2. Política Económica y Aprendizaje Desde El Capital Natural: La Teoría De Catástrofes Como Herramienta De Análisis.

Una de las alternativas adecuadas para la modelación de los comportamientos hipotéticos que hemos descrito, la teoría de catástrofes de René Thom. Esta teoría matemática parte de considerar que uno de los principales objetivos de las disciplinas científicas es caracterizar topológicamente los fenómenos más importantes:

"Toda ciencia es, antes que nada, el estudio de una fenomenología. Es decir: Los fenómenos que son objeto de una determinada disciplina científica aparecen como accidentes de formas definidas en un espacio dado, al que podemos llamar el espacio substrato de la morfología que se estudia" (Thom 1985:9).

Entonces, el punto de partida de la teoría de catástrofes es considerar los fenómenos como morfologías, y los procesos como cambios cualitativos morfológicos. Se entiende como catástrofe, en el sentido matemático, todo tipo de rompimiento o cambio abrupto en un comportamiento observado o estudiado.

Algunos seguidores de Thom, como Zeeman, elaboraron modelos comportamentales que explicaban la aparición de cambios discontinuos en los comportamientos de los animales (modelos etológicos), de los prisioneros en las cárceles (modelos psicológicos), y de fenómenos físicos como el rompimiento de puentes. Esta versatilidad manifiesta de la teoría de catástrofes se debe a ciertas características que la hacen susceptible de ser usada en diversos contextos teóricos. Según Thom (1985) toda disciplina que estudie morfologías puede partir de suponer una distinción entre puntos regulares y puntos catastróficos. Entonces, los cambios comportamentales, expresados como transformaciones morfológicas, pueden explicarse a través de las distintas clases de catástrofes matemáticas existentes.

En general se habla de siete catástrofes elementales debido a que sólo contamos con una descripción geométrica (topológica) rigurosa de siete transformaciones. Las siete catástrofes son comportamientos determinados sólo por un número limitado de "factores de control" (variables explicativas), sin que interesen, inicialmente, los mecanismos interiores de comportamiento que cada disciplina supone para sus sistemas (Saunders 1983). Este presupuesto la hace útil en muchos contextos teóricos, pues el proceso de modelación representa una adaptación de la composición matemática de la teoría de catástrofes a una teoría que se supone preexistente, pero que necesita ser aclarada.

La teoría de catástrofes es una de las pocas teorías científicas cuyo propósito principal es la modelación de los cambios cualitativos; y que es capaz, además de ofrecer modelos útiles para hacer predicciones cuantitativas. No obstante, a mediados de la década de los 70's la capacidad predictiva de los modelos de catástrofes fue cuestionada. Por ejemplo, James Croll lanzó un ataque en la revista *Science* a la teoría de catástrofes por su "debilidad" en la predicción cuantitativa. Por su parte, René Thom, ha subrayado enfáticamente que la modelación cualitativa, propia de la teoría de catástrofes, se complementa con la modelación cuantitativa:

"La esencia del método descrito aquí consiste en suponer a priori la existencia de un modelo diferencial subyacente al proceso a ser estudiado y, sin conocimiento explícito de lo que es el modelo, deducir de este simple supuesto de su existencia conclusiones relacionadas con la naturaleza de las singularidades del proceso. Entonces, la postulación de la existencia de un modelo proporciona consecuencias de naturaleza local y cualitativa; a partir de supuestos cuantitativos pero sin cálculos (casi siempre), obtenemos resultados cualitativos."(Thom 1976: 4).

La Teoría de Catástrofes, desde el punto de vista matemático, con teorías como la de los sistemas dinámicos (en tanto que analiza la evolución temporal de sistemas complejos) o la teoría de la bifurcación (en tanto que se ocupa de fenómenos en los que pueden presentarse de cambios repentinos en el comportamiento de un sistema), o la teoría de las singularidades (dado su interés por el estudio de superficies que experimentan fallas estructurales cuando se despliegan).

"podría definirse o la Teoría de Catástrofes como un método matemático para describir la evolución de formas de la naturaleza y que trata de explicar cómo y por qué la acción continua de fuerzas provoca cambios bruscos e insospechados" (Fernández Díaz 1994: 71).

Siguiendo la presentación hecha por el mismo autor, podemos señalar los elementos constitutivos principales de la teoría de catástrofes que permite definir las siete catástrofes elementales:

Sistema dinámico:

$$\frac{dx}{dt} = \Phi_i(x_i, v_h, t) \Rightarrow \begin{cases} i = 1, 2, \dots, n \\ h = 1, 2, \dots, m \end{cases}$$

Que cuenta con X , variables de estado de dimensión n y V , variables de control, de dimensión m .

Campo Vectorial: las trayectorias del sistema dinámico conforman un campo vectorial X en el espacio:

$$M^{(n+m)} \rightarrow R$$

Catástrofes Elementales: el comportamiento del sistema y las respectivas deformaciones del mismo se describen a través del conjunto de funciones diferenciables:

$$V(x, p) : M^{(n+m)} \rightarrow R$$

Que constituyen las catástrofes elementales de Rene Thom de dimensión $n + k$ donde x es el conjunto de n variables de estado “rápidas” o variables de comportamiento y k “variables lentas” o parámetros de control.

Despliegue Universal: el punto de equilibrio para este sistema se describe como:

$$\frac{dv}{dx} = v(x^*, p) = 0$$

Que es el espacio de despliegue universal de la catástrofe que puede llamarse también espacio de estabilidad M definido por un conjunto de puntos de equilibrio x^* correspondiente a los valores que toma p , el conjunto de parámetros de control.

Espacio de Control: El espacio de control C es la proyección del despliegue universal de la catástrofe M , sobre un espacio constituido por los ejes correspondientes a las variables lentas o parámetros de control.

Puntos Singulares: Los puntos de singularidad de las catástrofes están representados por la proyección de las discontinuidades sobre el espacio de control C .

Las siete catástrofes elementales de Thom se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 23. Catástrofes elementales de Thom.

CATÁSTROFE	DIMENSIÓN X	DIMENSIÓN C	FUNCIÓN
Pliegue	1	1	$x^3 + ux$
Cúspide	1	2	$x^4 + ux^2 + vx$
Cola de Milano	1	3	$x^5 + ux^3 + vx^2 + wx$
Mariposa	1	4	$x^6 + zx^4 + ux^3 + vx^2 + wx$
Umbilica Hiperbólica	2	3	$x^3 + y^3 + wxy + ux + vy$
Umbilica Elíptica	2	3	$x^3 + xy^2 + w(x^2 + y^2) + ux + vy$
Umbilica Parabólica	2	4	$x^4 + x^2y + wx^2 + zy^2 + ux + wy$

Fuente: Fernández Díaz (1994: 73)

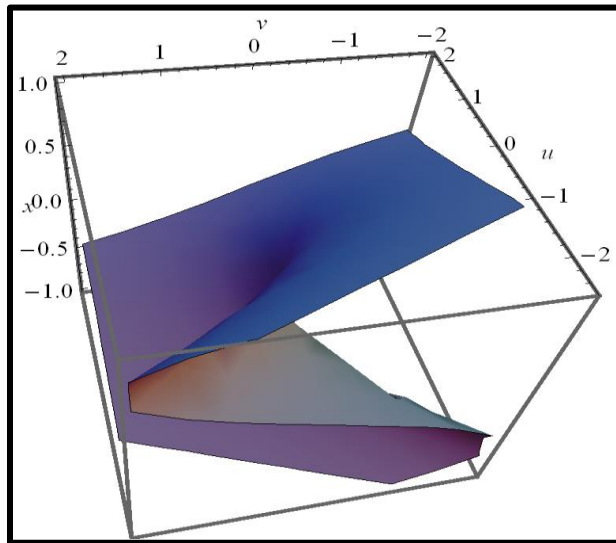
Desde el punto de vista de las aplicaciones hacia la teoría y la política económica, las aplicaciones de la teoría de catástrofes en economía se remontan al trabajo de Christopher Zeeman y su análisis de las burbujas en el mercado de capitales en 1974, David Rand en 1976 conjuntos de Pareto e Ives Balasko en 1978 y su análisis de equilibrio general; ha sido aplicada a temas tales como la teoría del ciclo, La Elección del consumidor, la inflación, la economía urbana, las economías singulares, las finanzas, entre otros (al respecto pueden consultarse Puu (2003), Rosser (2000), Rosser (2004), Accinelli (2001), Fernández Díaz (1994)).

10.2.1. La Catástrofe De Cúspide: Una Aproximación Geométrica

Siguiendo la aplicación desarrollada por Werner Sanns en su libro “La Teoría De Catástrofes: Una Aproximación Geométrica (2000), en el que se presentan las catástrofes elementales de Thom utilizando el programa Mathematica, adaptándolos a la versión 8.0, presentamos la catástrofe de cúspide, que servirá de base para el análisis del sistema híbrido de innovación.

```
Clear["Global`*"]
F[x_,u_,v_] := x^4 + u*x^2 + v*x
D1F[x_,u_,v_] := Evaluate[D[F[x,u,v],x]]
criticalpoints=ContourPlot3D[D1F[x,u,v]==0,{u,-2.5,2},{v,-2,2},{x,1,1},PlotPoints->6,Axes->True,AxesLabel->{u,v,x},Mesh->None,ContourStyle->{Gray},ViewPoint->{1.5,0.6,2},AxesStyle->Directive[Black,16],BoxStyle->Thickness[0.008]]
```

Figura 11. Superficie de la catástrofe de cúspide (despliegue universal)

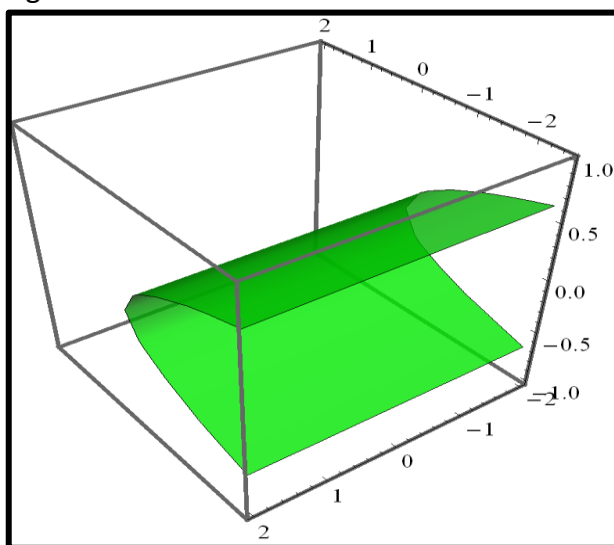


Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

El mismo procedimiento de graficación puede aplicarse al conjunto de puntos x, q donde la segunda derivada parcial de la función F respecto a la variable x es igual a cero:

```
D2F[x_,u_,v_] := Evaluate[D[D1F[x,u,v],x]]
scnd=ContourPlot3D[D2F[x,u,v]==0,{u,-2.5,2},{v,-2,2},{x,-1,1},
PlotPoints->6,ViewPoint->{-2.,1.5,2},Mesh->None,
ContourStyle->{Green,Opacity[0.8]},AxesStyle->Directive[Black,16],
BoxStyle->Thickness[0.008]]
```

Figura 12. Puntos críticos



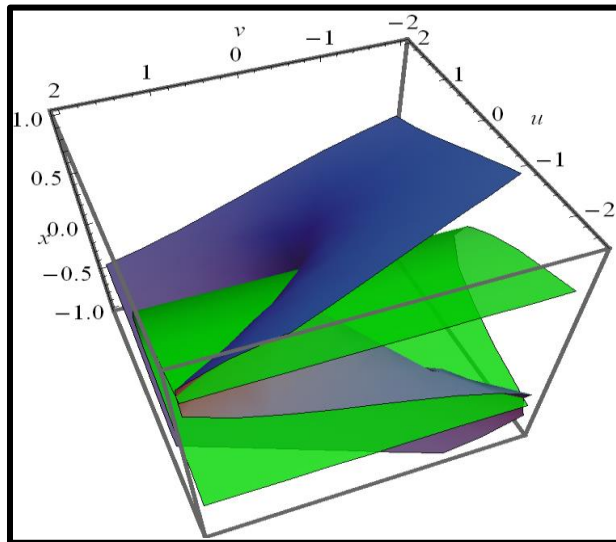
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

A continuación juntamos las dos figuras para conseguir el conjunto de catástrofes,

es decir, el conjunto de puntos críticos degenerados como la unión de dos figuras:

```
compose1=Show[criticalpoints,scnd,PlotRange→Automatic,AxesStyle→Directive[Black,16],BoxStyle→Thickness[0.008]]
```

Figura 13. Conjunto de catástrofes.



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

A continuación realizados los cálculos para los puntos críticos degenerados (el conjunto catastrófico el cual también llamaremos “línea doblada”). Resolvemos las ecuaciones que definen la línea doblada:

```
solu=Solve[{D1F[x,u,v]==0,D2F[x,u,v]==0},{u,v}]
```

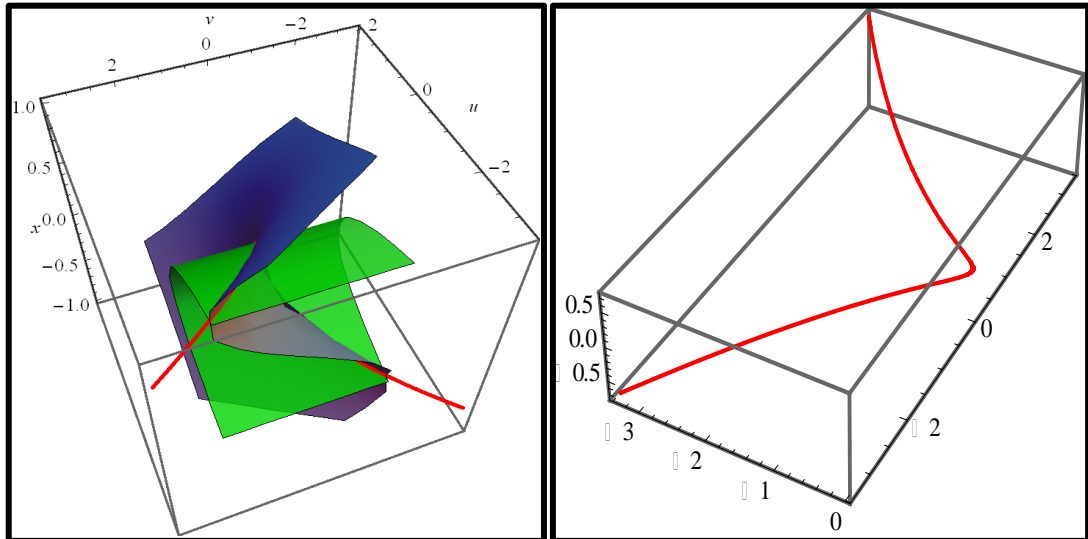
```
solu1=Flatten[solu]
{s,t}={u,v}/.solu1
{{u→-6 x2,v→8 x3}}
{u→-6 x2,v→8 x3}
{-6 x2,8 x3}
```

A continuación, se muestran ambas superficies juntas; puede observarse la proyección de la línea de doblez dentro del espacio de parámetros, es decir, en el plano u, v . Esta curva proyectada se denomina conjunto de bifurcación o curva de cúspide, y es la que da su nombre a esta catástrofe específica.

```
foldline=ParametricPlot3D[{s,t,x},{x,-0.75,0.75},PlotStyle→{Red,Thickness[0.008]},AxesStyle→Directive[Black,16],BoxStyle→Thickness[0.008]]
compose2=Show[compose1,foldline,AxesStyle→Directive[Black,13],BoxStyle→Thickness[0.005],ViewPoint→{-
```

```
15,0.6,2},AxesStyle→Directive[Black,16],BoxStyle→Thickness[0.008]]
```

Figura 14. Conjunto de bifurcación y curva de cúspide



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

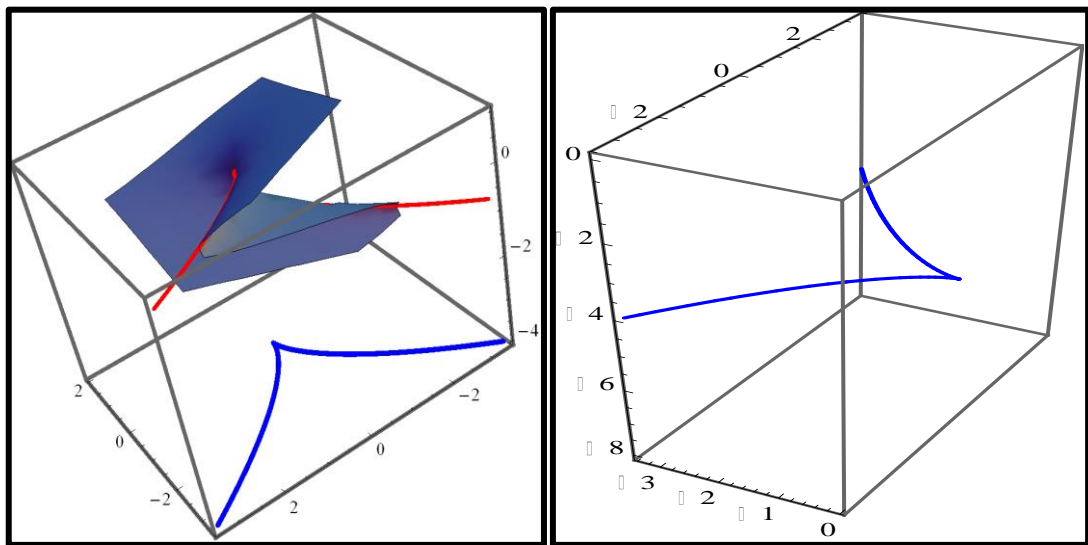
Esta imagen o figura muestra una curva que corresponde a un espacio de tres dimensiones necesitamos un tercer componente el cual por razones de visibilidad escogemos con un valor de -4 en el gráfico.

```
cuspid=ParametricPlot3D[{s,t,-4},{x,-0.751,0.75},PlotStyle→
```

```
{Blue,Thickness[0.01]},AxesStyle→Directive[Black,16],BoxStyle→Thickness[0.008]]
```

```
pic2=Show[cuspid,criticalpoints,foldline,PlotRange→Automatic,BoxStyle→Thickness[0.008],AxesStyle→Directive[Black,16]]
```

Figura 15. Conjunto de Catástrofe y línea de pliegue



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

Podemos, en esta figura observar de cerca el conjunto de bifurcación que representa el conjunto de puntos críticos (degenerados) sobre el espacio de parámetros. Esto nos presenta el espacio de parámetros, que es el plano $u - v$, dividido en dos regiones, en las cuales la función F exhibe algunas características importantes:

```
Clear[u,v,L]
```

```
L=Solve[{4*x^3+2*u*x+v==0,12*x^2+2*u==0},{u,v}]
```

```
{{u→-6 x^2,v→8 x^3}}
```

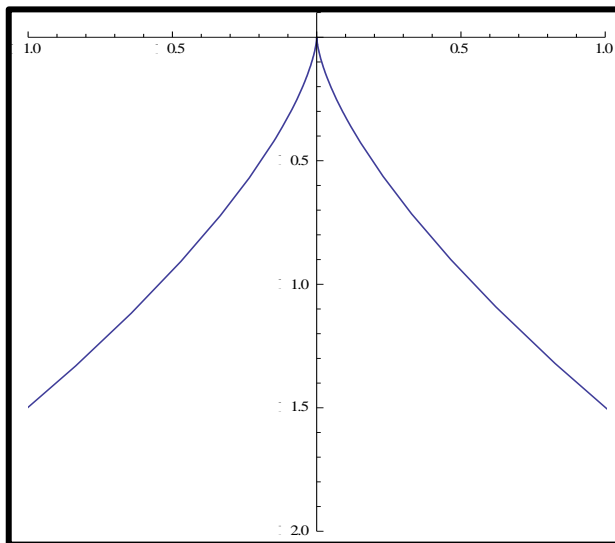
```
{s,t}={u,v}/.L//Flatten
```

```
{-6 x^2,8 x^3}
```

```
pic1=ParametricPlot[{t,s},{x,-1,1},PlotRange→{{-1,1},{-2,0.1}}]
```

Una representación de la curva de la cúspide es posible en una forma implícita tal y como puede observarse en el siguiente gráfico:

Figura 16. Curva de solución



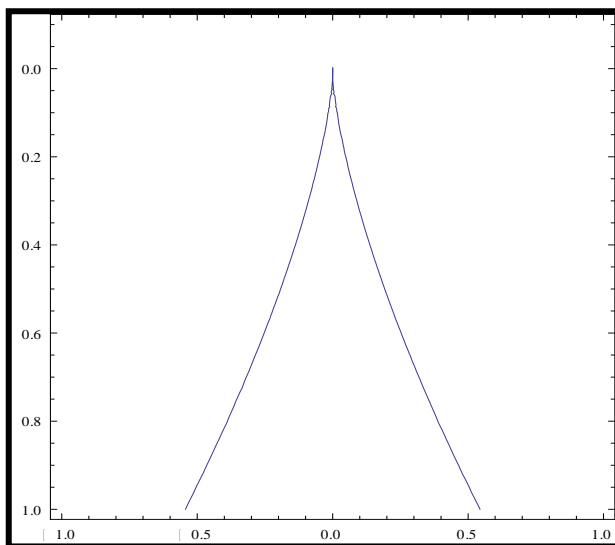
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

El conjunto de bifurcación puede especificarse de la siguiente manera:

```
Clear[u,v]
```

```
cusp=ContourPlot[8*u^3+27*v^2==0,{v,-1,1},{u,0.1,-1}]
```

Figura 17. Curva de cúspide



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

Las siguientes líneas de inputs en el programa mathematica 8.0 guardan el mismo objetivo:: generan algunas gráficas en un arreglo de gráfico simple con el propósito de hacer clara la manera en la que las secciones de la función **F** pueden representarse a cuando los parámetros **u** y **v** toman determinados valores en el espacio de parámetros. De especial interés son los casos en los cuales los puntos del espacio parámetros se seleccionan de tal manera que consideran con la curva de la

cúspide (conjunto de bifurcación).

Entonces la función **F** tiene, con respecto a x , un punto de silla en el mínimo. La razón por la que esta configuración es tan importante se mostrará más adelante. Las posiciones de los puntos, las cuales se representan en colores, y las correspondientes secciones (en el mismo color) se muestran en una figura única en la cual el conjunto de bifurcación aparece en el centro. Es de notarse que la función cambia su forma dependiendo de los parámetros u y v .

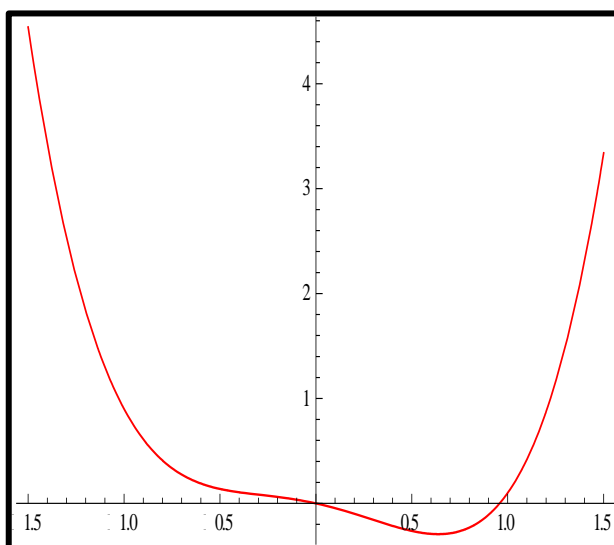
No solo lo vemos en el espacio de parámetros o el plano $u - v$ sobre la línea $u = 5$ desde los valores negativos de u a los positivos y esto significa que nos movemos a lo largo de la línea la cual corta la cúspide como puede observarse en la siguiente figura.

```
Clear[u,v]
u=-0.5
-0.5
Solve[8*u^3+27*v^2==0,v]
{{v→-0.19245},{v→0.19245}}
p1=Show[Graphics[{PointSize[0.02],RGBColor[0.5,0,0.2],Point[{-0.4,u}]}],DisplayFunction→Identity];
pic1=Plot[x^4-0.5*x^2-0.4*x,{x,-1.5,1.5},
PlotStyle→{RGBColor[1,0,0]}]
```

El primer punto con el que queremos estudiar el comportamiento de la función **F** está a la izquierda del Valor $v = -0.19245$, por ejemplo en $v = 0.4$.

La sección de **F** que empieza en ese en esos valores de los parámetros $(u,v) = (-0.4, -0.5)$ tiene la siguiente forma:

Figura 18. Punto de intercepción de la cúspide No.1



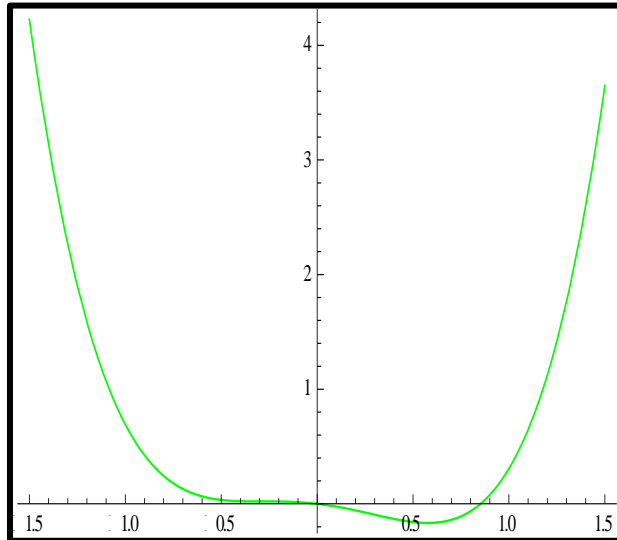
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

```

p2=Show[Graphics[{PointSize[0.02],RGBColor[1,0,0],Point[{
-0.19,u}]}],DisplayFunction->Identity];
pic2=Plot[x^4-0.5*x^2-0.19245*x,{x,-1.5,1.5},
PlotStyle->{RGBColor[0,1,0]}]

```

Figura 19. Punto de intercepción de la cúspide No.2



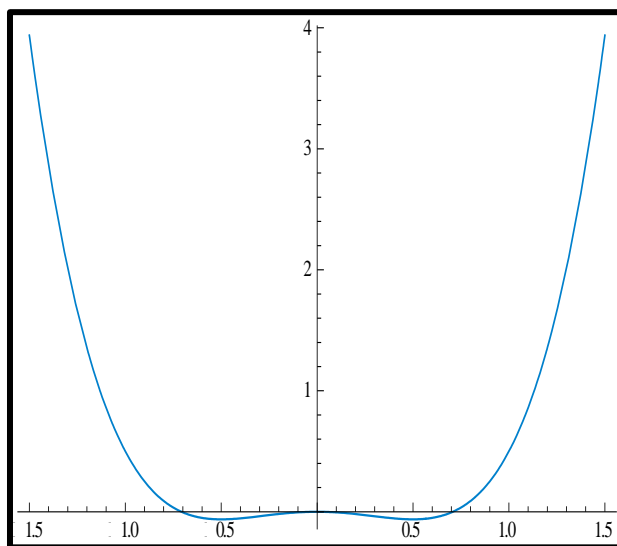
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

```

p3=Show[Graphics[{PointSize[0.02],RGBColor[0,0.5,0.8],Point[{
0,u}]}],DisplayFunction->Identity];
pic3=Plot[x^4-0.5*x^2-0*x,{x,-1.5,1.5},
PlotStyle->{RGBColor[0,0.5,0.8]}]

```

Figura 20. Punto de intercepción de la cúspide No.3



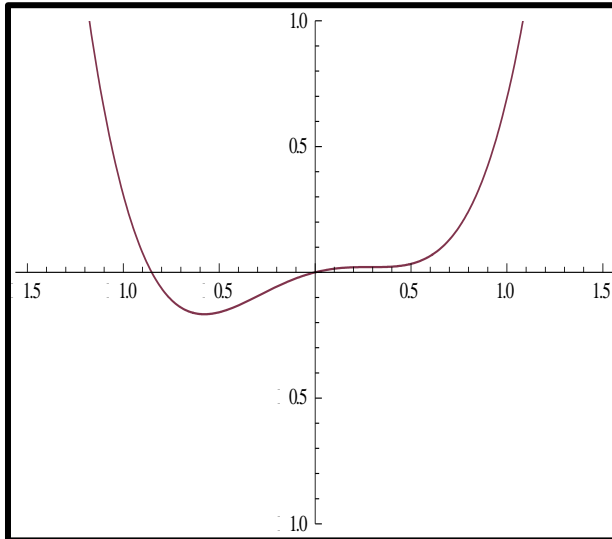
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

```

p4=Show[Graphics[{PointSize[0.02],RGBColor[0.5,0.2,0.3],Point[{0.19,u}]}],DisplayFunction->Identity];
pic4=Plot[x^4-0.5*x^2+0.19245*x,{x,-1.5,1.5},PlotRange->1,
PlotStyle->{RGBColor[0.5,0.2,0.3]}]

```

Figura 21. Punto de intercepción de la cúspide No.4



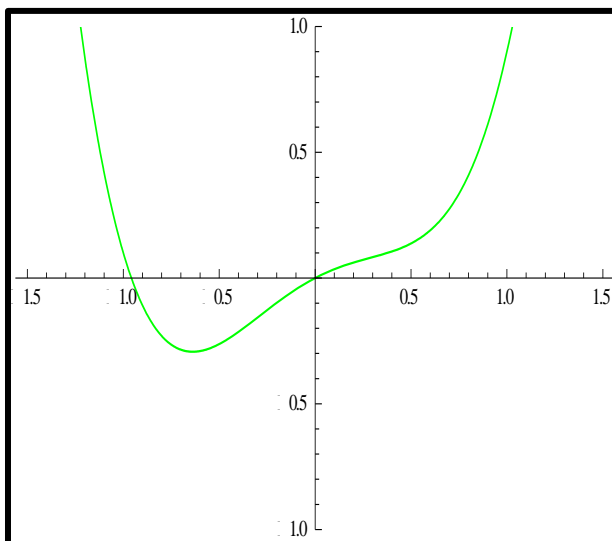
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

```

p5=Show[Graphics[{PointSize[0.02],RGBColor[0,1,0],Point[{0.4,u}]}],DisplayFunction->Identity];
pic5=Plot[x^4-0.5*x^2+0.4*x,{x,-1.5,1.5},PlotRange->1,
PlotStyle->{RGBColor[0,1,0]}]

```

Figura 22. Punto de intercepción de la cúspide No.5



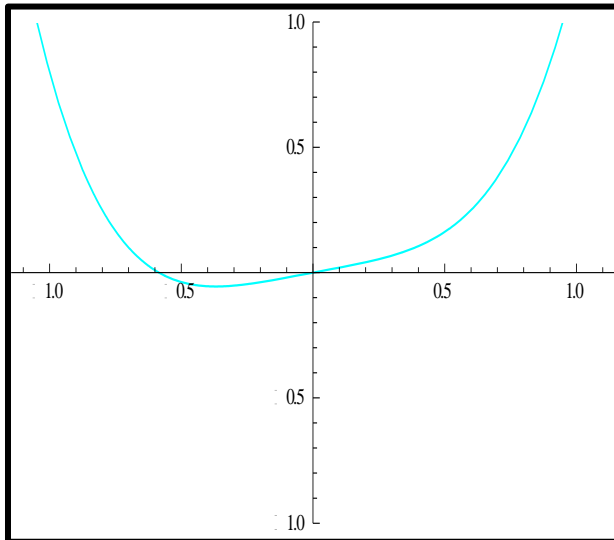
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

```

p6=Show[Graphics[{PointSize[0.02],RGBColor[0,1,1],Point[{
0,0.2}]}],DisplayFunction->Identity];
pic6=Plot[x^4-0*x^2+0.2*x,{x,-1.1,1.1},PlotRange->1,
PlotStyle->{RGBColor[0,1,1]}]

```

Figura 23. Punto de intercepción de la cúspide No.6



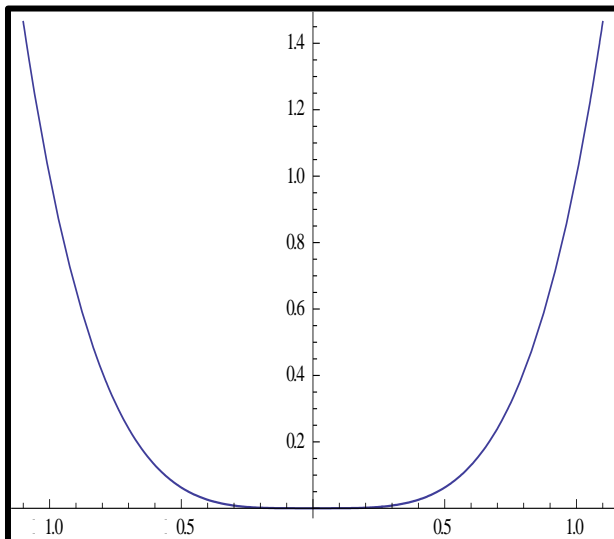
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

```

Origo=Show[Graphics[{PointSize[0.02],RGBColor[0,0,0],Point[{
0,0,0}]}],DisplayFunction->Identity];
picorigo=Plot[x^4,{x,-1.1,1.1}]

```

Figura 24. Punto de intercepción de la cúspide No.7



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

Ahora presentamos la cúspide junto con los puntos desde p1 hasta p6 en una sola figura. La línea desde p1 hasta p6 representa una trayectoria en el espacio de parámetros la cual hemos escogido de tal manera que nos permita observar la

influencia de los cambios en los parámetros sobre el comportamiento de la función F en los puntos p_1 , p_2 , y así sucesivamente.

```
txt1=Show[Graphics[{Text["",{-0.5,u-
0.1}],Text["",{0.5,0.4}],
```

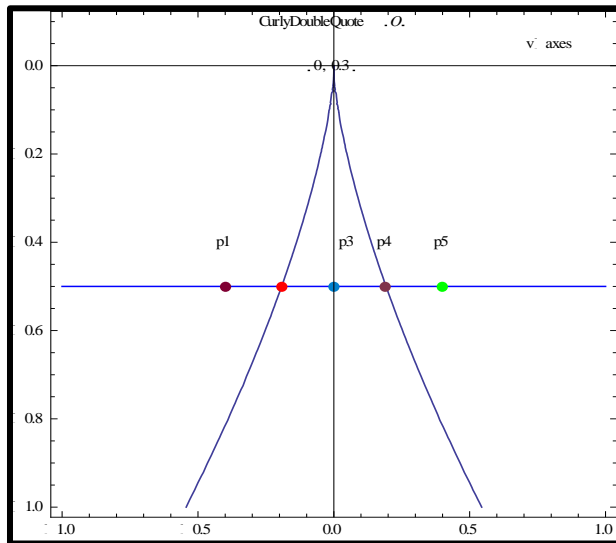
```
Text["O",{0,0+0.1}],Text["p6",{0,0.2+0.1}],Text["p1",{-
0.4,u+0.1}],Text["p2",{-
0.19,u+0.1}],Text["p3",{0.05,u+0.1}],
```

```
Text["p4",{0.19,u+0.1}],Text["p5",{0.4,u+0.1}]]],DisplayF
unction→Identity];
```

```
line=Show[Graphics[{Thickness[0.003],RGBColor[0,0,1],Line
[{{-1,-0.5},{1,-0.5}}]}],DisplayFunction→Identity];
```

```
res=Show[cusplab, axeslab, line, p1,p2,p3,p4,p5,p6,txt1,
DisplayFunction→$DisplayFunction, Axes→True]
```

Figura 25. Trayectoria en el espacio de parámetros (cambios en los parámetros).



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

Ahora es posible discutir el significado de ciertas constelaciones de parámetros cuando se presenta el comportamiento catastrófico del sistema. La trayectoria en el espacio de parámetros que hemos seleccionado muestra ciertos puntos característicos en los cuales la formación o desaparición de mínimos ocurre.

Si el sistema está en un estado estable definido mediante el mínimo de una función potencial, y ese mínimo desaparece (en un segundo momento, sobre la línea de la curva de cúspide) entonces puede aparecer un nuevo estado estable definido por otro mínimo (mostrado en la figura como un círculo claro sobre un nuevo mínimo); en este caso, un salto en el comportamiento del sistema ocurre y se presenta el fenómeno que se denomina catástrofe.

Con el propósito de encontrar o explorar otras propiedades de la catástrofe de cúspide graficamos la superficie de singularidades una superficie de catástrofes de la función F junto con diversas secciones; por ejemplo damos a u el valor 0.5 entonces tenemos en el siguiente resultado para una sección:

```
Clear[u]
vconst=0.5;
solu2=Solve[D1F[x,u,vconst]==0,{u}]
{{u→(0.5 (-0.5-4. x³))/x}}
{u1}=u/.solu2//Flatten
{(0.5 (-0.5-4. x³))/x}
seclv=ParametricPlot3D[{u1,vconst,x},{x,0.01,2},PlotStyle
→{Red,Thickness[0.009]},PlotRange→{{-5,5},{0.025,1},{-
2.1,2}},AxesStyle→Directive[Black,16],BoxStyle→Thicknes
```

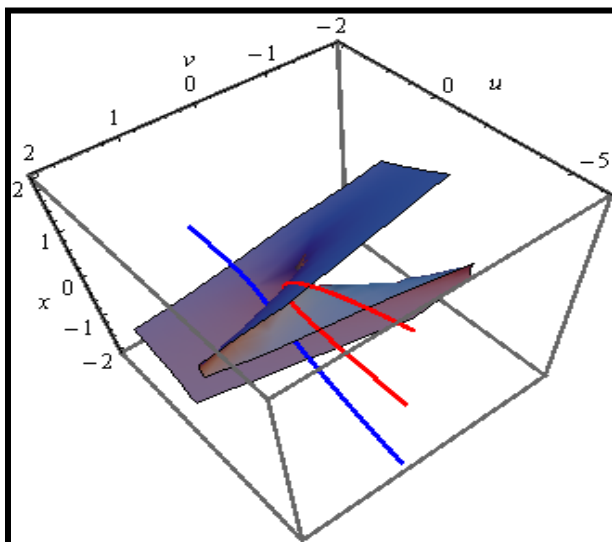
```

s[0.008]]
eps=0.01;
sec2v=ParametricPlot3D[{u1,vconst,x+eps},{x,-2,-
0.01},PlotStyle→{Blue,Thickness[0.009]},PlotRange→{{-
5,5},{0.025,1},{-
2.1,2}},AxesStyle→Directive[Black,16],BoxStyle→Thicknes
s[0.008]]
Show[criticalpoints,sec1v,sec2v,BoxStyle→Thickness[0.008
],AxesStyle→Directive[Black,14],PlotRange→Automatic,Vie
wPoint→{0,2,1.5},AxesStyle→Directive[Black,16],BoxStyle
→Thickness[0.008]]

```

La siguiente figura muestra la típica propiedad de la cúspide que se denomina bifurcación:

Figura 26. Propiedad de bifurcación en la catástrofe de cúspide.



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

La propiedad de bifurcación implica, a manera de ejemplo, que la trayectoria a lo largo de la curva desde los valores positivos del parámetro u hacia sus valores negativos, puede exhibir un incremento en el número de soluciones de la ecuación (pasando las soluciones desde una hasta tres); por ello, la sección a lo largo de la curva súbitamente tiene tres ramas en un punto. Los otros brazos o ramas que representan mínimos estables de la función F , es decir el equilibrio estable del sistema. La rama interior representa un máximo inestable.

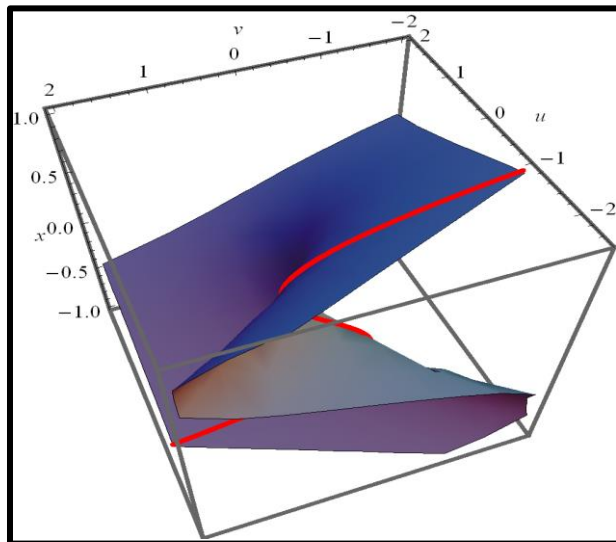
Otra característica de la cúspide, puede observarse cuando escogemos una sección en la que tomamos un valor constante de u , por ejemplo $u = -1$.

```

Clear[v]
uconst=-1;
solu2=Solve[D1F[x,uconst,v]==0,{v}]
{{v→-2 (-x+2 x³)}}
{v1}=v/.solu2//Flatten
{-2 (-x+2 x³)}
seclu=ParametricPlot3D[{uconst,v1,x+eps},{x,-
1,1},PlotStyle→{Yellow,Thickness[0.01]},PlotRange→{{-
5,5},{-1,1},{-
2.1,2}},BoxStyle→Thickness[0.008],AxesStyle→Directive[B
lack,16]]
Show[criticalpoints,seclu,BoxStyle→Thickness[0.008],Axes
Style→Directive[Black,16],PlotRange→Automatic,ViewPoint
→{-1.5,0.6,2}]
c1=ContourPlot3D[D1F[x,u,v]==0,{u,0,2},{v,-2,2},{x,-
1,1},PlotPoints→6,ViewPoint→{-
2,1.5,2},Axes→True,AxesLabel→{u,v,x},Mesh→None,ContourS
tyle→{Thickness[0.008],Gray},BoxStyle→Thickness[0.008],
AxesStyle→Directive[Black,16]]

```

Figura 27. Propiedad de histéresis en la catástrofe de cúspide



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

Histéresis: la sección muestra otra propiedad de la cúspide a la cual se denomina Histéresis. La Histéresis puede ocurrir en fenómenos de la física y de la economía, y el sentido que tiene en este modelo de catástrofes consiste en que, por ejemplo, la trayectoria a lo largo de la curva representada en color rojo sobre la superficie el sistema (manifold), podría presentar un salto en los límites del doblez, hacia la hoja inferior de la hoja o superficie.

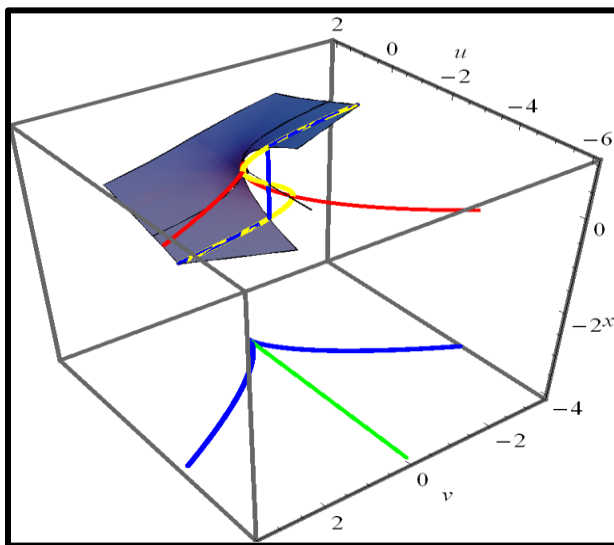
A continuación las partes superior e inferior de la superficie se dibujan para la línea $u = 0$ en el espacio de parámetros. La curva sobre la superficie calculada debería dibujarse sólo para la línea $v = 0$ y, entonces, se corta.

```

v1
-2 (-x+2 x^3)
n=Solve[v1==0,x]
{{x->0},{x->-(1/Sqrt[2])},{x->1/Sqrt[2]}}
v2=If[x<-Sqrt[2]^(-1)||x>1/Sqrt[2],v1,0];
sec2u=ParametricPlot3D[{uconst,v2,x+eps},{x,-
1,1},PlotStyle->{Blue,Thickness[0.008]},PlotRange->{{-
5,5},{-1,1},{-
2.1,2}},DisplayFunction->Identity,BoxStyle->Thickness[0.0
08],AxesStyle->Directive[Black,16]]

```

Figura 28. Convención de Maxwell.



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

La curva (línea) que se muestra de color verde es el conjunto de Maxwell de la catástrofe cúspide. Sobre el conjunto de Maxwell, la función F tiene dos mínimos con el mismo valor crítico y pueden presentarse saltos en el comportamiento del sistema.

DIVERGENCIA: la última propiedad de la cúspide que se ilustra es la denominada como divergencia. Yendo a través de la superficie (con un valor de $v = 0.1$ y -0.1) y partiendo desde dos puntos muy cercanos entre sí, las curvas – con ellas el sistema- puede mostrar un comportamiento muy diferente; como puede observarse a través de los siguientes cálculos:

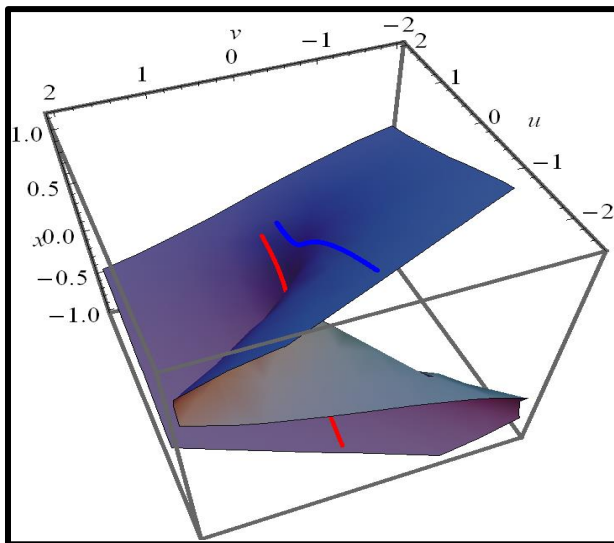
```

Clear[x,u,vconst,uconst]
eps=0.1
0.1
vconst=0.1
0.1
L = Solve[D1F[x, u, vconst] == 0, {u}]
{{u→(0.5 (-0.1-4. x3))/x}}
compon=u/.%
{(0.5 (-0.1-4. x3))/x}
u1=compon[[1]]
(0.5 (-0.1-4. x3))/x
diverg1=ParametricPlot3D[{u1,vconst,x+eps},{x,-1,-
0.05},PlotStyle→{Red,Thickness[0.008]},PlotRange→{{-
1,1},{-1,1},{-
1,0}},BoxStyle→Thickness[0.008],AxesStyle→Directive[Black,16]]
vconst=-0.1
-0.1
L=Solve[D1F[x,u,vconst]==0,{u}]
{{u→(0.5 (0.1 -4. x3))/x}}
compon=u/.%
{(0.5 (0.1 -4. x3))/x}
u1=compon[[1]]
diverg2=ParametricPlot3D[{u1,vconst,x+eps},
{x,0.05,1},PlotStyle→{Blue,Thickness[0.010]},PlotRange→
{{-1,1},{-
1,1},{0,1}},BoxStyle→Thickness[0.008],AxesStyle→Directive[Black,16]]
Show[criticalpoints,diverg1,diverg2,
PlotRange→Automatic,BoxStyle→Thickness[0.008],AxesStyle
→Directive[Black,16]]

```

Se dibujan ambas curvas juntas con la superficie de catástrofe:

Figura 29. Propiedad de divergencia en la catástrofe de cúspide



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0.

De acuerdo o en relación con él. El sistema se podría comportar muy diferente a pesar de que las trayectorias partan de valores idénticos o muy cercanos.

10.3 Un Análisis No Lineal De Interacción Tecnológica A Través De Un Modelo De Teoría De Catástrofes.

10.3.1. El Uso De La Dinámica No Lineal

Nuestro objetivo en este apartado es el estudio de las condiciones que pueden permitir un manejo sostenible del sistema de innovación natural. La pregunta relevante, en el contexto de esta pregunta, es ¿Cuáles son las circunstancias que permiten mantener el sistema de innovación natural en condiciones óptimas?

Tanto las características intrínsecas de los ecosistemas naturales, como el tipo complejo de procesos que induce su acoplamiento con los sistemas económicos, sugieren la adopción de modelos de comportamiento No Lineal para su estudio:

“En principio, la gestión eficiente de los ecosistemas implica los mismos principios económicos correspondientes a la gestión eficiente de combustibles fósiles y otros bienes de capital. Sin embargo, los ecosistemas poseen diversas varias características que hacen de una buena gestión, un asunto particularmente problemático. Ellos son, primero que todo, un sistema adaptativos no lineales altamente complejos, con extensas interconexiones entre sus componentes.”(Arrow et al. 1999:3).

El modelo ha de ser coherente con las condiciones del sistema híbrido de innovación, en el cual tenemos:

- Un sistema económico híbrido compuesto por productores naturales
- Una relación entre cada productor y los demás productores
- Pueden aparecer externalidades tecnológicas entre los productores naturales, de tal manera que hay una simetría curiosa: los productores naturales dan a los productores humanos tecnologías que estos usan. Con frecuencia éstos no pagan por ellas.
- Así que hay en la interrelación humanos y naturaleza una dualidad: un incentivo monetario que recibe el productor humano, y un incentivo “en especie” que recibe el productor natural.
- Desde el punto de vista de los productores naturales, si no hay un pago directo o indirecto (o sea, si se pretende darles un pago monetario, que no significa nada para ellos), no reciben un incentivo, sino un desincentivo.
- La política económica –de ser necesaria- debería ser capaz de “conectar” los sistemas de incentivos “natural” y “humano”, para ser efectivas.

10.3.2. La Necesidad De La Política Económica En Un Sistema Híbrido De Innovación: Una Aplicación Del Modelo De Cúspide

La estructura básica del proceso de producción emplea las bases provistas por el modelo de internalización de externalidades de (Varian 1992), se utiliza una función de costes cúbica en el contexto de un modelo de catástrofes, lo que permite hacer una aproximación al sistema de innovación híbrido, compuesto por productores naturales y humanos relacionados en un proceso de aprendizaje que conduce a generar innovaciones.

Tenemos un proceso de maximización de beneficios sociales, en el que participan dos empresas, dos productores; un productor humano y un productor natural, que pueden representarse como un productor integrado, en el sentido de que conforman un sistema de producción conjunta que produce una mercancía denominada X , que se vende a un precio de mercado p . El ingreso total puede expresarse, entonces, como pX , y tenemos una función de maximización de beneficios sociales, con internalización de externalidades, cuando el productor humano depende de una tecnología natural para producir el bien que ofrece en el mercado la cual puede expresarse así:

Beneficios Sociales

$\pi(X) = \text{Ingresos} - \text{Costo privado del productor humano} - \text{Costo Externo sobre el productor natural}$

La función cúbica de costes totales viene dada por:

$C(x) = X^3 + aX + bX + c$, donde:

a : costo fijo de la producción hecha por el hombre,

b : costo fijo de la producción hecha por el productor natural,

c : costo fijo de externalidad negativa.

Con parámetros tecnológicos fijos en el corto plazo (no tenemos costos variables porque estamos en el corto plazo), la función puede expresarse de la siguiente manera:

$C(x) = X^3 + \delta X + \lambda$, Donde $(a + b) = \delta$, $c = \lambda$,

a : en unidades de precio monetario

b, c : en unidades de precio “natural” o sea, “en especie”.

El productor humano aprovecha las tecnologías naturales, los naturfactos producidos por el productor natural, los cuales tienen asociado un costo fijo δ , y adicionalmente causa un daño ambiental que implica otro costo fijo adicional λ .

Entonces, la función de costos totales sociales es:

$C(x)$: Costo Total

$C(x) = X^3 + \delta X + \lambda$,

Donde:

δ : Costo fijo de producción del agente humano,

λ : Costo fijo del productor natural, debido a la externalidad causada por el productor humano

La función de beneficios totales se puede expresar cómo⁸⁹: $\pi(x) = I(X) - C(X)$

Donde $\pi(x)$: beneficios netos

$$\pi(X) = pX - (X^3 + \delta X + \lambda)$$

$$\pi(X) = pX - X^3 - \delta X - \lambda$$

$$\pi(X) = pX - \delta X - X^3 - \lambda$$

$$\pi(X) = -X^3 + X(p - \delta) - \lambda$$

⁸⁹ La correspondiente función de beneficio del productor natural, en esta especificación simplificada es: $\pi(x) = \delta - \lambda$

El Proceso de maximización puede expresarse así:

$f(X, (p - \delta)) \equiv \pi(x) + \lambda = -X^3 + X(p - \delta)$, Representando el beneficio social conjunto de equilibrio

La aproximación a la condición de primer orden en la que el precio iguala al coste social marginal.

$$f'(X) = -3X^2 + (p - \delta)$$

En principio, la aproximación a la condición de segundo orden estaría dada por:

$$f''(X) = -6X$$

El Conjunto de bifurcación, asociado a la catástrofe de cúspide se obtiene eliminando la variable de estado X de las ecuaciones:

$$f'(X) = -3X^2 + (p - \delta) = 0$$

$$f''(X) = -6X = 0$$

Con $X = 0$, tenemos que $r = (p - \delta)$

Geométricamente, $f'(X) = -3X^2 + (p - \delta)$, es una parábola en la que: $(p - \delta) = r$, actúa como eje de simetría.

Los puntos críticos están dados por: $\pm \sqrt{(p - \delta)/3}$

Para $(p - \delta) > 0$, mínimo

Para $(p - \delta) < 0$, máximo

Para $(p - \delta) = 0$, Punto Crítico, Punto Degenerado, Punto de Bifurcación

El beneficio (social) se maximiza, siguiendo una trayectoria que depende de los cambios o variaciones en el parámetro que relaciona el precio de mercado con el precio correspondiente al productor natural $(p - \delta)$, especialmente dependiendo de los movimientos del precio de mercado.

El sistema, dadas sus características de estabilidad estructural, puede tomar:

- Una trayectoria estable, si se dirige a la rama estable del conjunto de bifurcación; es decir, si los precios suben de manera continua e incremental.
- Una trayectoria inestable, si se dirige a la rama inestable del conjunto de bifurcación; esto es, si los precios caen de manera incremental pero continua.
- Una trayectoria de cambio catastrófico; si se dirige al punto de producción cero, después de una caída continuada de precios, puede experimentar un cambio radical: sobrepasa el umbral de tolerancia ecológica, es decir, la capacidad de carga del ecosistema que soporta al sistema integrado de innovación.

En términos de estática comparativa, los cambios en el equilibrio debidos a modificaciones en el parámetro r : La trayectoria de equilibrio es predecible; después de repeler el brazo inestable del conjunto de bifurcación, se dirige al brazo estable que actúa como “atractor”.

Pero aquí tenemos una combinación de precios de mercado y precios naturales, que dado el tipo de relación existente entre los dos tipos de productor, en la que el productor natural aprovecha las tecnologías naturales sin reconocer —en principio— una retribución o compensación al productor natural, una parte del mercado es un mercado a la sombra y nada garantiza que la dinámica sea suficiente para evitar la caída en una situación de deterioro ambiental irreversible, $p - \delta > 0$ por lo que debe garantizarse, de parte de un agente o agencia externa que esto sea así; es decir, que la política económica es necesaria para garantizar la provisión de bienes y servicios desde el sistema de producción natural, necesaria para el proceso de producción humano. La estructura de dicha política económica debería implicar la estimación de un sistema de equivalencia entre $p - \delta$ (los precios natural y humano) y garantizar que la relación no cae, de tal manera que $(p - \delta) = 0$ con $r \leq 0$.

10.2.2. Dinámica del Modelo de Cúspide para un Sistema Híbrido de innovación (Empleando Mathematica 8.0)

La función de Beneficios Totales es⁹⁰: $\pi(x) = I(X) - C(X)$

Donde: $\pi(x)$ beneficios netos

$$\pi(X) = pX - (X^3 + \delta X + q)$$

⁹⁰ La correspondiente función de beneficio del productor natural, en esta especificación simplificada es: $\pi(x) = \delta - q$

$$\pi(X) = pX - X^3 - \delta X - q$$

$$\pi(X) = pX - \delta X - X^3 - q$$

Conforman un sistema:

$$\pi(X) = -X^3 + X(p - \delta) - q \quad (2)$$

$$f'(X) = -3X^2 + (p - \delta) \quad (3)$$

$$f''(X) = -6X = 0 \quad (4)$$

Con $X = 0$, tenemos que $r = (p - \delta)$

Despejando de la ecuación (3) la r

$$r = 3x^2 \quad (5)$$

Si se reemplaza la ecuación (5) en la ecuación (1) obtendremos q en términos de x :

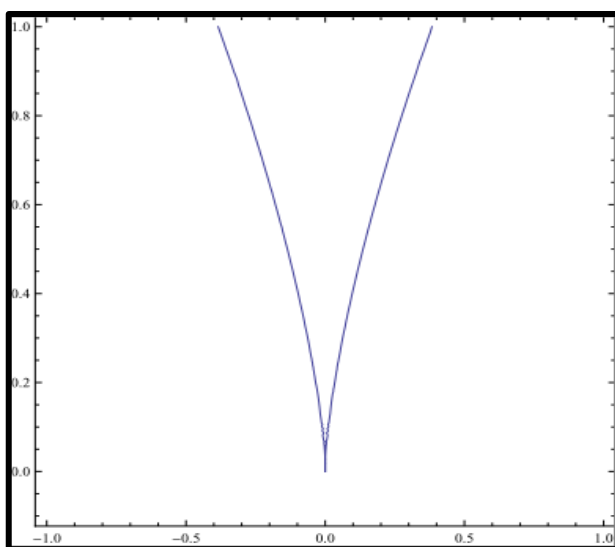
$$q = -2x^3 \quad (6)$$

Tomamos las ecuaciones (5) y (6) y las igualamos, obteniendo:

$$27q - 4r^3 = 0 \quad (7)$$

La ecuación (7) muestra en el plano de control las líneas del doblez (líneas plegadas) de la superficie (manifold). Empleando el programa Mathematica se grafica la ecuación (7), con esta Figura se quiere mostrar, en un rango determinado, cuál es la dirección que puede tomar esta función (Figura 18). En Este caso, se definió el rango q (-1,1) y r (1,-0.1).

Figura 30. Curva de Cúspide para el sistema híbrido de innovación.



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

Posteriormente con la Figura 1 se escoge un valor de μ que atraviese la ecuación para mostrar el comportamiento cuando está afuera y adentro de las líneas de doblez. Se escogió para el valor de $r = 0.5$, es decir fijando μ vamos a observar los cambios en el comportamiento del sistema.

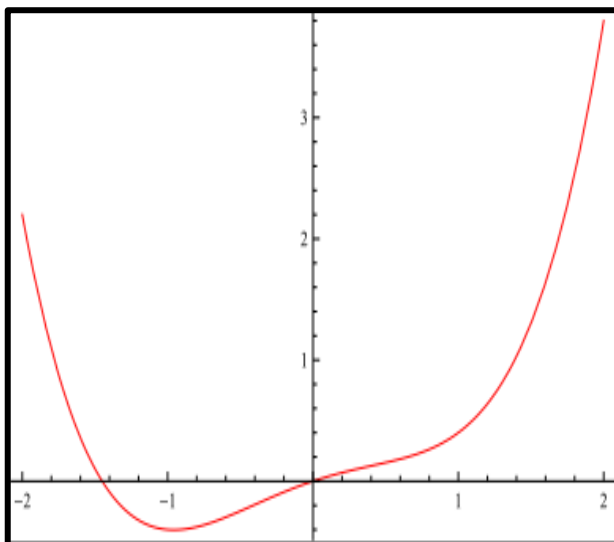
Dado que $r = 0.5$ se reemplaza en la ecuación (7) para obtener el valor de q . Obtenemos así que q toma los valores de $(-0.136083, 0.136083)$, estos valores están exactamente sobre la línea de doblez de la cúspide. Entonces, se busca conocer cómo es el equilibrio de cualquier punto a izquierda o derecha, sobre y al interior de las líneas de doblez de la cúspide. De esta manera empezamos por saber qué ocurre con un punto a la izquierda y por fuera de las líneas plegadas.

De acuerdo al ejemplo, $r = 0.5$ y un punto a la izquierda de la línea de doblez podría ser cualquier valor menor a -0.136083 . Tómese entonces $q = -0.4$. Los valores de estos parámetros se reemplazan en la ecuación (0). Obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{4}x^4 - 0.25x^2 + 0.4x \quad (8)$$

Al graficar la ecuación (7) obtenemos el equilibrio al margen izquierdo de la línea de doblez (ver la Figura 19). La Figura nos muestra que hay un mínimo estable.

Figura 31. Punto de intercepción No.1 para el sistema híbrido de innovación



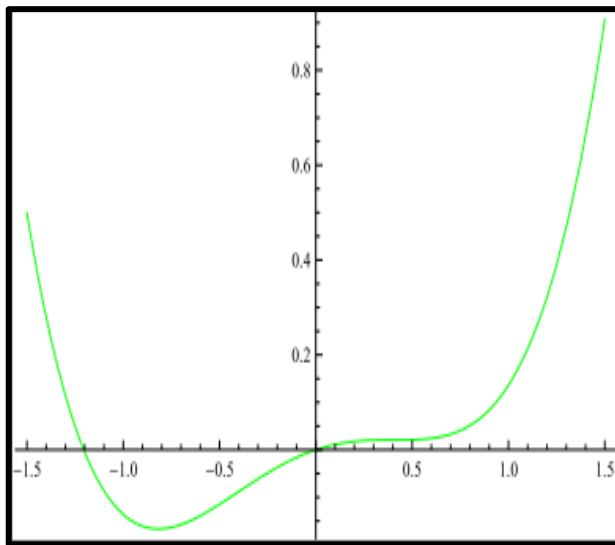
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

Ahora tomemos el punto exacto sobre la línea de doblez izquierda, es decir cuando $q = -0.136083$. Al sustituir en la ecuación (0), se muestra que:

$$\frac{1}{4}x^4 - 0.25x^2 + 0.136083x \quad (9)$$

Al graficar se observa que el equilibrio igualmente es un mínimo local (ver Figura 3).

Figura 32. Punto de intercepción No.2 para el sistema híbrido de innovación



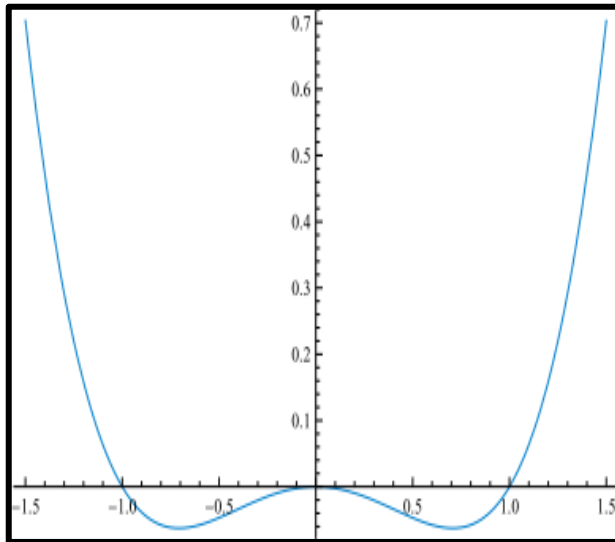
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

Al correr hacia la derecha sobre el mismo valor de $r = 0.5$ se sitúa adentro de las líneas de doblez de la cúspide. Tomemos cualquier valor entre $(-0.136083, 0.136083)$, el más usado es $q = 0$. La ecuación (9) queda de la siguiente manera:

$$\frac{1}{4}x^4 - 0.25x^2 \quad (10)$$

En este caso el sistema tiene un comportamiento diferente. Si se dibuja la ecuación (10) es posible observar que se obtiene un máximo (inestable) y dos mínimos estables (Figura 4).

Figura 33. Punto de intersección No.3 para el sistema híbrido de innovación



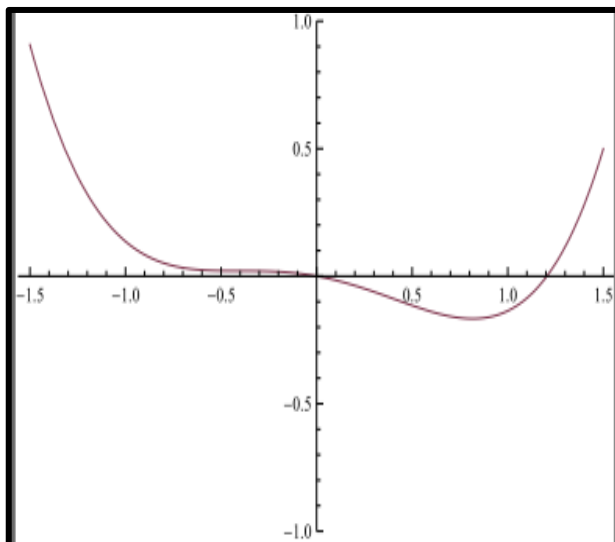
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

Ahora tomemos el punto exacto sobre la línea de doblez al margen derecho, es decir cuando $q = 0.136083$. Al sustituir en la ecuación (2), se muestra que:

$$\frac{1}{4}x^4 - 0.25x^2 - 0.136083x \quad (10)$$

De la misma manera, el equilibrio es un mínimo local como se muestra en la Figura:

Figura 34. Punto de intersección No.4 para el sistema híbrido de innovación



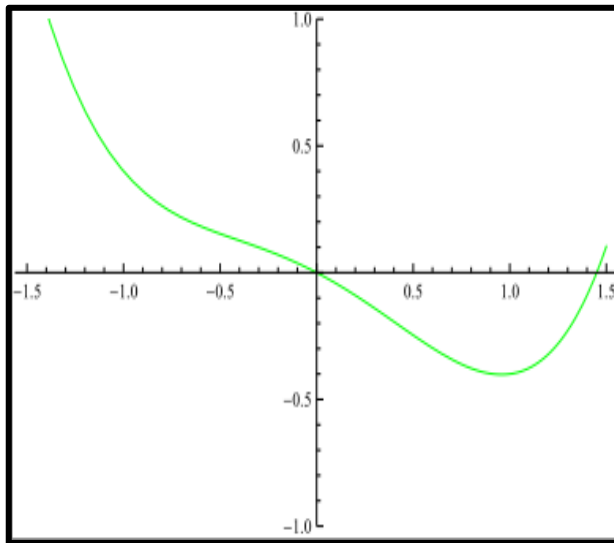
Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

Ya saliéndonos de las líneas de doblez y tomando un valor de q al margen derecho, para hacerlo simétrico supongamos $q = 0.4$, se sustituyen nuevamente los valores en la ecuación (0), así:

$$\frac{1}{4}x^4 - 0.25x^2 - 0.4x \quad (11)$$

Al graficar la ecuación (11) obtenemos el equilibrio al margen derecho de la línea de doblez (ver la Figura 6). Lo cual representa también un mínimo estable.

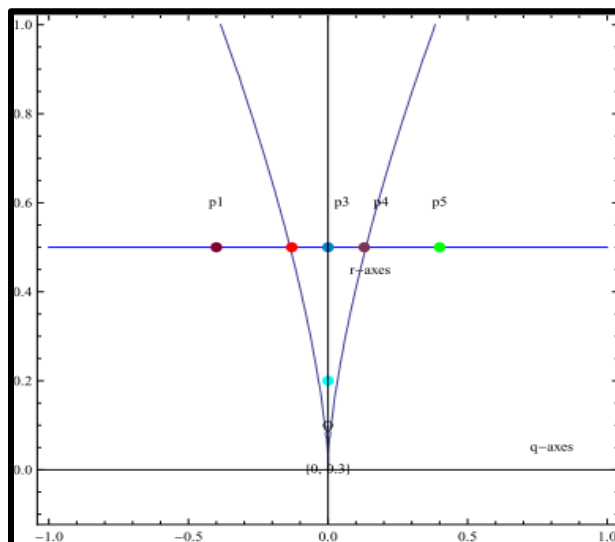
Figura 35. Punto de intercepción No.5 para el sistema híbrido de innovación



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

Si graficamos todos los puntos analizados en el plano de control de la cúspide (gráfico 1). Obtenemos el gráfico 7.

Figura 36. Trayectoria en el espacio de parámetros para el sistema híbrido de innovación



Fuente: Elaboración del autor con Mathematica 8.0

Los puntos $p1$ y $p5$ muestran el comportamiento del sistema por fuera del doblez, como se mencionó antes tiene un equilibrio estable –mínimo-. Los puntos $p2$ y $p4$ representan el lugar exacto donde se dobla la cúspide, justo en este punto el equilibrio no ha cambiado, es decir, sigue siendo un mínimo. Sin embargo, una vez

se dobla (al interior de las líneas de doblez), es decir en el punto p3, el sistema cambia y tiene un máximo inestable y dos mínimos estables.

10.4. Conclusiones y discusión final

Se trata de un modelo de funcionamiento del sistema híbrido de innovación a través del cual se consideran de manera explícita las condiciones bajo las cuales puede ser alcanzado el óptimo social entre los productores naturales y humanos. Una adecuada dinámica de incentivos, la cual implica algún tipo de remuneración o compensación económica a los agentes naturales quienes están integrados en una relación económica con los agentes económicos, quienes reciben incentivos de mercado.

CAPÍTULO XI

Hacia El Diseño De Un Sistema De Incentivos Para La Sostenibilidad De Los Sistemas Híbridos De Innovación

11. Hacia El Diseño De Un Sistema De Incentivos Para La Sostenibilidad De Los Sistemas Híbridos De Innovación

11.1. La necesidad de un sistema de derechos de propiedad para la gestión del sistema híbrido de innovación.

Hemos planteado la necesidad de reconocer como hecho económico relevante el aporte realizado por las tecnologías provenientes de la naturaleza en el proceso de producción e innovación humano, partiendo de una revisión de los modelos de desarrollo sostenible característicos de diversas aproximaciones que fundamentan la política económica en este campo y de los indicadores y elementos de evaluación que los mismos emplean (Capítulos 2-5).

El reconocimiento de que el capital natural es una fuente de valiosos conocimientos de naturaleza tecnológica (Capítulo 6) que son incorporados a través de tres tipos de aprendizaje desde el capital natural que pueden denominarse bioinspiración (Capítulo 7), biomimética (Capítulo 8) y bioutilización (Capítulo 9) como parte del proceso de producción e innovación humano, nos ha permitido un reconocimiento detallado de la dependencia o interdependencia entre tecnologías naturales y humanas que configura un “sistema híbrido” de innovación.

La necesidad de contar con una política económica que conduzca a una gestión adecuada de este sistema híbrido de innovación fue explorada a partir de la modelación de los procesos de aprendizaje del capital natural y de la dinámica del sistema en un modelo de cúspide propio de la teoría de catástrofes (Capítulo 10). Se plantea la necesidad de diseñar algún esquema de incentivos o compensación adecuado para el sostenimiento de la capacidad de generar tecnologías naturales por parte de los ecosistemas.

Puesto que el capital natural ofrece un flujo de conocimientos acumulado, el cual es aprovechado mediante procesos de aprendizaje, nos planteamos ahora el interrogante de si deben existir instituciones de protección a los derechos de propiedad para este tipo, muy peculiar, de conocimientos, proveniente de agentes económicos naturales. Este tipo de agentes, a pesar de no poseer capacidades “intelectuales”- pues no tienen una intención creativa- genera -como hemos sugerido con la evidencia mostrada antes- un conjunto de naturfactos o tecnologías naturales que representan un tipo específico de innovación, razón por la cual es pertinente plantear esquemas de protección y de compensación al agente innovador, a fin de contar con un marco de incentivos que garantice la continuidad en el proceso de producción e innovación.

Las políticas económicas específicas para la promoción de la innovación han alcanzado altos niveles de sofisticación, referidos tanto a las áreas de la ciencia, la tecnología y la innovación propiamente dicha, enfocadas a sectores individuales (educación, investigación básica) o bien a “sistemas de innovación (lo que podría llamarse el “enfoque sistémico”). Las aportaciones a la teoría y la configuración de criterios de políticas económicas para la innovación se remontan a los trabajos de economistas de gran influencia tales como Kenneth Arrow (1962) y su trabajo sobre el rol de las patentes como mecanismo de protección a la invención, William Nordhaus (1969) y sus consideraciones acerca de las condiciones óptimas de las patentes, Richard Nelson (Mazzoleni y Nelson 1998) y sus reflexiones acerca de los costos y beneficios de los sistemas de patentamiento, los análisis de Paul David (1998), en relación a los mecanismos de derecho de propiedad, o Beng Ake Lundvall (2007) en relación a los sistemas nacionales de innovación, entre otros⁹¹.

Dado que los sistemas de derechos de propiedad al uso parten de la premisa de protección al “autor” y a la “creatividad” o la “investigación científica”, es pertinente preguntarnos –en el caso de las tecnología naturales- de qué manera podemos proteger un sistema productor de innovaciones (naturfactos) que no tiene como métodos de producción de conocimiento a la investigación científica, no posee “creatividad” en el sentido humano del término, ni puede tipificarse, en principio, como un “autor” individual.

Un primer elemento a tener en cuenta, es la característica sistémica que tiene el capital natural, como red de ecosistemas, en los cuales es fundamental la preservación de la biodiversidad. Buena parte de los diagnósticos referidos a los problemas de pérdida de la biodiversidad, que se ocupan del diseño de políticas económicas, coinciden en señalar la necesidad de implementar sistemas de derechos de propiedad, como complemento de otro tipo de sistemas de incentivo y regulación.

Para Perrings et al (1995a) las causas de la pérdida de la biodiversidad pueden provenir tanto de problemas de mercado como de problemas gubernamentales y podrían clasificarse de la siguiente manera:

- Fallos de mercado: Las instituciones humanas, -el mercado entre ellas- no responden automáticamente a la dinámica de los feedbacks o retroalimentaciones naturales.

⁹¹ El lector interesado, puede consultar las revisiones hechas a esta temática realizadas por Langinier y Moschini (2002), Fagerberg et al. (2006).

- Fallos del gobierno: Las políticas gubernamentales exacerbaban el problema de las externalidades ambientales negativas al subsidiar a los usuarios de la biodiversidad, incentivando la sobreexplotación, y haciendo que la divergencia entre el costo social y el privado sea mayor.
- Problemas de los ecosistemas: Los ecosistemas siguen funcionando en el corto plazo aunque su resiliencia (de largo plazo) disminuye.

Desde este punto de vista, el objetivo de la política económica tendiente a la conservación es la protección de los organismos que establecen y mantienen los nichos que son la piedra angular del mantenimiento de la biodiversidad. Esos organismos deben considerarse “capital natural de seguridad” para asegurar la provisión de servicios ambientales, y esta función de aseguramiento incluye la provisión de recursos genéticos y la capacidad de los ecosistemas, para funcionar en el presente y el futuro.

Las implicaciones de política económica de esta propuesta se refieren, principalmente a los siguientes elementos:

- El establecimiento de reservas es una buena política de corto plazo, pero no es suficiente
- Debe implementarse una estrategia que preserve la capacidad de los ecosistemas, manteniendo su resiliencia
- Deben tenerse en cuenta las fuerzas económicas y sociales que determinan la pérdida de biodiversidad (la estructura de derechos de propiedad, los fallos del gobierno, etc.)
- Es necesario crear incentivos que hagan igualar al valor privado y social de la biodiversidad.
- Es necesaria la creación de instituciones efectivas para la lograr los objetivos planteados con la conservación. Más que dedicarnos a áreas con altos niveles de biodiversidad, debemos estimular instituciones, políticas y patrones de consumo y producción no agresivos con el medio natural

Por su parte, Swanson (1995) se pregunta acerca de la naturaleza del sistema de derechos de propiedad necesario para incluir o tomar en cuenta los valores de la diversidad biológica dentro del marco de toma de decisiones humano. Su conclusión es que los sistemas internacionales de derechos de propiedad deben ser flexibles para reconocer la contribución a la economía, al desarrollo de las industrias, de la contribución realizada por las poblaciones que detentan el conocimiento tradicional. Por ejemplo, si una sociedad genera información útil para la industria farmacéutica a través de la inversión en capital natural (la no-conversión

de los bosques, por ejemplo) en tanto que otra genera tal información mediante la inversión en capital humano (entrenamiento escolar e investigación de laboratorio), cada una debe tener una institución que reconozca esa contribución.

Swanson y Goschl (2000), en su análisis de la industria de crianza de plantas, la cual depende de manera sensible de la biodiversidad disponible en el entorno natural, proponen tres niveles de análisis:

En primer lugar, un nivel básico en el que el medio natural produce un flujo de información, usando inputs (tierra, diversidad). En segundo lugar, un nivel intermedio en el que los agricultores canalizan la información hacia el mercado; se trata de individuos que observan la información producida por la naturaleza, la usan y la difunden, realizan inversión en el uso de la tierra y en I+D; igualmente dedican recursos a la selección y discriminación de las plantas más aptas. Finalmente, un tercer nivel, en el que están los criadores de plantas, quienes preparan y venden productos e información a los consumidores.

Cada nivel debe invertir en ciertas formas de I+D para poder aprovechar la información que proviene del nivel anterior. En el tercer nivel, los criadores de plantas deben hacer inversión en el uso de laboratorios y científicos, en el segundo, las comunidades indígenas o los usuarios locales dedican recursos a la selección y discriminación de plantas, en tanto que en el primer nivel, la naturaleza hace una inversión en el uso de la tierra y efectúa un proceso selección natural.

Esta industria, en suma, realiza la crianza de mejores variedades, usando las seleccionadas por los agricultores y creadas por la naturaleza, que pueden ser consideradas como un stock de conocimientos, constituido, por ejemplo, por la información contenida en las plantas que se acumula, encapsulando la información que la naturaleza ha generado.

Tal y como los autores lo señalan, los sistemas existentes solo crean incentivos para el nivel (tres) de la industria que está directamente conectado con el consumo directo y no cubren a los niveles básico e intermedio, lo que implica que tanto el medio natural en el que se produce la información tecnológica (en el que se sitúan los agentes económicos naturales), como el nivel intermedio en el que se sitúan los agentes económicos humanos que observan, usan y transmiten los conocimientos provenientes del capital natural.

Buena parte de la riqueza correspondiente a la biodiversidad está concentrada en los países en desarrollo, y en buena parte de ellos no existen políticas o esquemas de gestión que provean incentivos para la conservación in situ a través de los

sistemas existentes de derechos de propiedad intelectual porque los agricultores u otros agentes económicos que observan, usan y difunden el conocimiento proveniente desde el capital natural no reciben retornos relacionados con dichas actividades, y sus derechos no están reconocidos. Adicionalmente, la industria localizada en países desarrollados no incorpora aún los mecanismos de compensación correspondientes.

Esta situación implica que las opciones de política económica deban ser orientadas hacia el desarrollo de un sector de protección de las tecnologías naturales, es decir, de la capacidad de los ecosistemas para proveer bienes y servicios que representen fuentes de solución tecnológica, y hacia el desarrollo de sistemas de derechos de propiedad intelectual que generen derechos adecuados, de tal manera que se cuente con un conjunto de incentivos específicos para garantizar tal provisión.

La asignación de derechos de propiedad intelectual tan solo a las compañías y agentes que actúan en relación directa al mercado o al consumo, tal y como lo hace el sistema prevaleciente, no sería problemático si los costos de transacción fuesen bajos para los agentes económicos que observan, usan, difunden, gestionan el capital natural y generan procesos de aprendizaje desde el capital natural en contacto directo con el medio natural; lo cual podría implicar que, si no existe aún un derecho de propiedad reconocido universalmente, la efectividad del esquema de derechos es restringido.

Es posible plantear formas indirectas de solución para la gestión, las cuales consistirían en la provisión de incentivos para que la industria se vuelva centralizada o integrada verticalmente, permitiendo que los tenedores de derechos controlen los estados anteriores del proceso, o bien, haciendo que los oferentes puedan moverse hacia etapas cercanas al mercado para ser capaces de usar los derechos.

También podría pensarse en la creación de derechos para bienes intermedios (recursos genéticos, por ejemplo) como una alternativa frente al sistema que asigna derechos solo a los agentes o compañías que tienen contacto directo con el mercado.

Los resultados de nuestro modelo de política económica sugieren que los ecosistemas (que en muchos sentidos deben considerarse “locales”) que no reciben el incentivo adecuado, pueden perder la capacidad de ofrecer a la economía humana el cúmulo de conocimientos que poseen, con lo que tenemos un conflicto entre el “óptimo” individual y el “óptimo” social. Autores como los mencionados antes han tipificado esta situación, pero tan sólo para el caso en el que existe una relación entre agentes económicos humanos -por ejemplo la relación entre agentes

económicos humanos a nivel “local” (situados, por ejemplo en un país en desarrollo) y a nivel “global” (situados, por ejemplo, en un país desarrollado).

Una de las razones por las que no se han desarrollado sistemas de derechos de propiedad intelectual correspondientes a los agentes económicos naturales, como agentes que contribuyen al proceso de producción e innovación es la ausencia de reconocimiento explícito dado a la existencia del proceso de “intercambio” entre agentes económicos naturales y humanos que está en el origen de las tecnologías humanas basadas en las tecnologías naturales.

Existe, pues, un problema de “fallo de los derechos de propiedad”, que puede ocurrir siempre que el inversor en un activo no es el poseedor de los derechos de propiedad. Nuestro análisis sugiere que en el caso de agentes, compañías e industrias que usan tecnologías naturales (naturfactos) para crear bienes y servicios humanos (artefactos), es necesario crearlos; en aquellos casos en los que los derechos existan, pero estén incompletos, habría que extenderlos, cumpliendo, entonces, con el objetivo de crear mecanismos de incentivo específicos que logren impactar la dinámica del agente natural, que opera en un ecosistema dado.

Frente al problema de determinar quién debe ser el tenedor de los derechos, puede decirse que un sistema de retribuciones que pretende ser eficaz, debería buscar la generación de una tasa de retorno para cada agente generador de la información (conocimiento), o para cada poseedor del derecho, y adicionalmente, en términos de incentivos debe tenerse en cuenta que los fallos en el sistema de derechos de propiedad, los valores monetarios (precios) no indican el valor del recurso. Una consecuencia de ello es que los estudios empíricos más que reflejar los valores correctos del recurso, reflejan ese fallo. Adicionalmente, debe ser tenido en cuenta que en aquellos casos en los que el recurso es sistémico por naturaleza, es difícil dividirlo en mercancías discretas que sean “capturadas” por un sistema de derechos de propiedad. En consecuencia, deben considerarse maneras alternativas de protección.

Como hemos mostrado, las tecnologías naturales, esos bienes y servicios asociados al conocimiento que reside en el capital natural, provienen de un conjunto de recursos cuyo funcionamiento es sistémico, y pueden representar tanto técnicas (instrucciones) como bienes: estos últimos con frecuencia pueden considerarse como unidades discretas, tangibles; en tanto que las primeras, de carácter intangible, al constituir formas de conocimiento que fluyen hacia el sistema económico, tienen la limitación señalada por Swanson y Goschl.

Probablemente sea un mecanismo que proteja no sólo a cada etapa en la que está involucrado el proceso de aprendizaje del capital natural, sino a cada forma de conocimiento, empleando esquemas de derechos de propiedad intelectual como los de propiedad industrial (invenciones, marcas comerciales, diseño industrial, denominaciones de origen) o los de Copyright (trabajos literarios, artísticos, musicales, audiovisuales).

El esquema propio del “copyright” tiene como ventaja su capacidad de proteger al resultado de un proceso creativo más que al individuo creador; dado que la naturaleza crea innovaciones pero existen dificultades prácticas para la identificación individual del agente productor, podría resultar relevante la aplicación de alguna variedad de este esquema.

Por otra parte, en lo tocante al posible uso de instrumentos tales como las patentes para la protección de la biodiversidad a través de sistemas de derechos de propiedad intelectual, tal y como lo indican Posey y Dutfield (1996) y Crucible Group (1994) deben considerarse dos situaciones; en primer lugar, la relación naturaleza - humanos es asimétrica, del tipo principal – agente; de aquí resulta la necesidad de que cualquier instrumento aplicable debería hacer más transparente el mercado. En segundo lugar, la relación entre humanos que usan el recurso proveniente de la biodiversidad, frecuentemente está tipificada por un usuario “rico” o “extranjero” y otro “local” o “pobre”, lo cual refleja una situación frecuente, en la que buena parte de la biodiversidad está ubicada en países pobres pero es aprovechada principalmente por los países ricos, lo cual lleva a concluir que el escenario de explotación óptima es aquél en el que existe cooperación entre el usuario extranjero (rico) y el local (pobre) y para lograr la explotación óptima, es necesario el desarrollo de un sistema de protección por patentes, o un régimen de derechos de propiedad intelectual.

Como puede verificarse, diversos autores proponen el diseño y la aplicación del instrumento de derechos de propiedad intelectual (en este punto podría decirse que se verifica un consenso), pero sin considerar explícitamente el rol desempeñado por los agentes naturales. En consecuencia, parece pertinente sugerir lagunas modificaciones a los sistemas de protección existentes: la efectividad de los instrumentos y del sistema de derechos de propiedad debe tener en cuenta el hecho de que existe una parte del conocimiento que no puede ser aprehendido porque es tácito, y ello implica considerar el rol desempeñado por los agentes que poseen o tienen el contacto primario –al menos en parte- con ese conocimiento tácito: Los indígenas y comunidades locales, que son ampliamente reconocidos por los estudiosos del tema de la conservación de los recursos

asociados a la biodiversidad, y los agentes económicos naturales, cuyas características hemos hecho explícitas.

Como puede verse, a través de lo expuesto en los capítulos seis al diez, existen diversas modalidades de aprendizaje desde el capital natural, que deben ser tenidas en cuenta en el diseño de los instrumentos económicos, los cuales, para ser eficaces, deben reconocer la naturaleza dual del sistema de incentivos propio de un sistema híbrido de innovación (“monetarios”, “en especie”).

Además, el instrumento óptimo debe –simultáneamente- proteger la capacidad de innovar de los agentes naturales a la vez que incentiva a los agentes económicos humanos a usar más eficientemente esos conocimientos tecnológicos naturales.

Algunos ejemplos de productos que solo tienen protección en el tercer nivel planteado por Swanson y Goschl pues se trata de patentes dadas a empresarios o empresas sobre medicinas naturales descubiertas por indígenas y comunidades locales, son:

- Turmeric (patente No. 5401504 de Das y Cohly 1995), una planta de propiedades curativas descubiertas por los indígenas americanos.
- Ayahuasca: es una planta que posee propiedades medicinales, propia de la zona amazónica, que ha sido utilizada por los indígenas de la zona para usos medicinales y espirituales (patente No. 5751 de Miller 1986), aunque las oficinas de patentes y comercio de los Estados Unidos De Norteamérica cancelaron esta patente ante las reclamaciones hechas por las autoridades.
- Agentes antidiabéticos (patente No. 5900240 de Tomer et al. 1999) obtenidos a partir de mezclas de plantas descubiertas por los antiguos habitantes de la india.
- Variedades del arroz basmati propias del área geográfica comprendida entre el norte de la india y Pakistán, patentadas por empresas privadas sin dar reconocimiento al proceso de selección hecho por las comunidades locales (patente No. 5663484 de Sarreal et al. 1997).

11.2. Algunas Medidas De Política Económica E Instrumentos Económicos Para El Manejo De La Biodiversidad

Una vez hemos destacado algunas de las características que debe tener un instrumento óptimo, vamos a hacer una exposición de los instrumentos disponibles, provenientes de diferentes perspectivas de gestión de la sostenibilidad (débil, fuerte, etc.)

Para la economía ambiental, la biodiversidad tiene valor por el uso directo (consumo y producción) que pueda dársele, y valores indirectos, relacionados con los servicios ecosistémicos que provee. Un valor de opción (valor de preservación para uso de las generaciones futuras); un valor de cuasi-opción (valor asociado a la información), y un valor de existencia (valor de conservación de recursos sin depender del uso humano).

El papel de los Incentivos económicos, desde este punto de vista, es el de propiciar la conservación mediante el incentivo (o desincentivo) del comportamiento de los agentes económicos humanos; en particular, han sido planteados sistemas de derechos transferibles de desarrollo (TDR), que pretenden crear un mercado de derechos transferibles (Panayotou 1994), que consisten en la declaración de áreas de conservación y la prohibición de algunos tipos o todo tipo de desarrollo. Este mecanismo se ocupa de:

- Legislar para que la transferencia de derechos que tienen los propietarios pueda hacerse hacia otros sitios no protegidos (oferta).
- Legislar acerca del uso, compra, venta de derechos (demanda).

Con ello se crea un mercado, cuya dinámica implica que un país “rico” paga por la conservación, mientras otro país “pobre” puede dedicarse, entonces, a conservar los recursos. Los demandantes prefieren comprar derechos de uso en vez de tierras en áreas de desarrollo, en las que éstas son más costosas.

Desde el punto de vista de la Economía Ecológica (Toledo 1998), plantea que pueden hacerse críticas a la “capitalización” de la naturaleza, desde el punto de vista de la “economía política de la biodiversidad”, pero considera como una opción válida el establecimiento de derechos de propiedad a las comunidades locales e indígenas.

A continuación planteamos un sumario de los instrumentos planteados por las diferentes perspectivas y escuelas de pensamiento económico, referidos a la conservación y gestión de los recursos de la biodiversidad, que cubre instrumentos

de naturaleza muy variada: incentivos fiscales, incentivos monetarios y no monetarios (bienes y servicios a comunidades locales), bonos de deuda, etc.

11.2.1. Una Clasificación De Los Instrumentos Y Las Medidas De Política Económica Para El Manejo De La Biodiversidad

Los incentivos pueden desempeñar un papel positivo o negativo (de hecho, los Incentivos perversos son señales económicas que inducen comportamientos que degradan o agotan la biodiversidad).

Algunos autores (por ejemplo Emerton 2000; McNeely 1988) agrupan las medidas de política (incentivos y desincentivos) dentro de grandes categorías principales:

- I. Instrumentos fiscales: medidas presupuestarias de aplicación de impuestos y subsidios a los bienes y servicios
- II. Creación de mercados: medidas de racionalización de precios y perfeccionamiento de mercados para los bienes y servicios relacionados con la biodiversidad. Buscan una asignación eficiente y hacer eficiente la disposición a pagar por el uso de servicios ambientales (o por el daño causado).
- III. Medidas y mecanismos financieros: medidas que requieren de la provisión de seguridad monetaria cuando las actividades económicas pudiesen causar pérdidas y degradación de la biodiversidad. Se trata de fondos monetarios que deben depositarse antes de que se lleve a cabo la actividad, para asegurarse frente a posibles daños; son reembolsables cuando los daños no ocurren.
- IV. Derechos de propiedad: medidas de asignación de derechos para la propiedad, uso y manejo de la biodiversidad, en aquellos casos en los que la ausencia de derechos de propiedad claramente definidos es causante de fallos en el mercado.
- V. Incentivos en especie y de naturaleza no económica: medidas de compensación económica no monetarias y medidas de regulación y cumplimiento legal obligatorio.
- VI. Instrumentos Financieros: Una manera de financiar la conservación de la biodiversidad puede ser la utilización de instrumentos financieros y bancarios.

La siguiente tabla, muestra una clasificación comprehensiva de mecanismos e instrumentos económicos y no económicos:

Tabla 24. Medidas e instrumentos de política económica para la gestión de biodiversidad.

CLASIFICACIÓN MEDIDAS DE POLÍTICA E INSTRUMENTOS PARA EL MANEJO DE LA BIODIVERSIDAD	
INCENTIVOS ECONÓMICOS	
MONETARIOS	
SISTEMA	INSTRUMENTO
Medidas Fiscales	Impuestos: Impuestos a la contaminación, Impuestos a Inputs, Impuestos a productos, Impuestos a exportaciones e importaciones, Tarifas a las importaciones
	Tasas: Tasas Por Polución, Tasas Por Uso, Tasas De Uso, Tasas Por Betterment, Tasas Por Impacto, Royalties, Tasas Administrativas, Gravámenes turísticos, Tasas de Entrada
Creación De Mercados	Permisos de emisión transables
	Cuotas de captura transables
	Derechos de desarrollo transables
	Participaciones de agua transables
Medidas y Mecanismos Financieros	Instrumentos Financieros Tradicionales: <ul style="list-style-type: none"> • Préstamos a Cargo de La Banca Privada y Multilateral • Concesiones (Grants) y Préstamos a Cargo de Organizaciones No Gubernamentales, gobiernos, Banca multilateral (Grants y Préstamos Blandos) • Subvenciones y Asignaciones Presupuestales: a cargo de Gobiernos (Interés Subsidiado y Subsidios financieros)
	Instrumentos Financieros No Tradicionales: <ul style="list-style-type: none"> • Bonos de desempeño Ambiental (por ejemplo por manejo forestal) • Bonos de reclamación de tierras • Bonos de transporte de residuos • Bonos de accidentes ambientales Sistemas de depósito reembolsables • Fondos de Confianza (Trust Funds) • Fundaciones • Perdón o Alivio de Deuda • Deuda Por Naturaleza • Mercados de seguros

Continúa en la página siguiente

INSTITUCIONALES	
Derechos De propiedad	Derechos de Propiedad: Titulación de tierras, Derechos de acceso al agua y Derechos de explotación Minera
	Derechos de Uso: Licencias, Permisos de acceso, Derechos de Desarrollo, Derechos de Uso exclusivo
NO MONETARIOS	
Incentivos En Especie	Alimento por trabajo dedicado a la conservación
	Equipo por trabajo dedicado a conservación
INCENTIVOS SOCIALES	
Obligaciones y Responsabilidades	Obligación Legal
	Cargos Por Incumplimiento
	Incentivos De Cumplimiento Obligatorio
Medidas de Cumplimiento	Multas
	Confiscación De derechos
	Obligación directa
	Auditorías
Acuerdos Y Tratados	Acuerdos Internacionales
	Acuerdos Regionales
	Acuerdos Nacionales
	Acuerdos Sectoriales
Regulaciones	Permisos de Cosecha/pesca
	Delimitación de Zonas de Desarrollo
	Estándares de Precaución
Licencias y Permisos	Licencias de Cosecha
	Licencias de Cría
	Permisos de exportación
	Permisos de Bio – prospección
Sistemas De Acreditación	Etiquetado
	Acreditación Industrial
	Acuerdos de Estatus Especial
	Autoregulación
Premios	Condecoraciones
	Premios
“Empoderamiento”	Manejo compartido
	Derechos para Acceder a la información
	Derecho a la Modificación de Decisiones
Información	Educación
	Investigación
	Monitoreo

Fuente: Elaboración del autor, basado en Bayon, Lovink y Veening (2000), McNeely 1988), Vorhies, (1996) y Pearce (2007).

11.3. Otros Elementos Relevantes Para el Diseño De Un Sistema De Protección e Incentivo De La Innovación Natural⁹².

11.3.1. Contratos Que Hacen Compatibles El Aprovechamiento de la Biodiversidad y La Conservación.

11.3.1.1. Biotics Ltd.

De importancia para el diseño de instrumentos o esquemas de gestión, de políticas, pueden resultar los casos de dos esquemas de manejo de la biodiversidad, relacionados con recursos útiles para las compañías farmacéuticas: de un lado, tenemos el caso de Biotics Ltd., una compañía privada, que ejerce el rol de intermediaria entre oferentes (países de Latinoamérica, Asia y África) y demandantes (compañías farmacéuticas) de plantas útiles para la investigación farmacológica. Su estrategia básica de operación es brindar al oferente un contrato en el que se pagan unas £ 25 por kilogramo de material básico además del 50% de las ganancias (royalties) que Biotics Ltd. pueda obtener con el producto, de los cuales una parte debe dedicarse a proyectos de conservación de la biodiversidad. Se estima que biotics Ltd., a su vez, obtiene ganancias situadas en un rango de entre \$50 y \$200 por dar a sus compradores la posibilidad de tener la exclusividad del material por un período de 6 meses (prorrogable a 1 año).

11.3.1.2. El INBio

De otra parte, El INBio de Costa Rica (institución pública). El instituto nacional de biodiversidad de costa rica es una institución que tiene la exclusividad del acceso a los recursos de biodiversidad costarricenses. Ha establecido un sistema de contratos -por ejemplo, el contrato realizado con la compañía Merck & Co. en el año 1991, mediante el cual ofrece muestras de plantas, insectos y material biológico (por un periodo de 2 años), por las cuales la compañía ofrece un pago de Un millón de dólares, además de los royalties sobre los desarrollos de productos obtenidos con las muestras. El INBio es una institución pionera en cuanto que ha sido una de las primeras dirigir los pagos por royalties hacia organizaciones dedicadas principalmente a la conservación de la biodiversidad.

11.3.2. Patentes Y Licencias Comerciales Ligadas a Fondos De Inversión

⁹² El lector interesado puede consultar obras como las de (McKinstry et al. 2006), (Bagnoli et al. 2008), (OECD 1999), (Deke 2008) las cuales presentan compilación y exposición de casos y modalidades de protección a la biodiversidad.

11.3.2.1. El Fondo De Reconocimiento De Los Recursos Genéticos Y De Patentes Genéticas De Malí

En el caso del fondo de reconocimiento de los recursos genéticos y de patentes genéticas de Malí, un esquema de patentamiento fue aplicado a la protección de variedades especiales de arroz. El elemento clave, en esta oportunidad, es el gen - Xa21- de la variedad de arroz salvaje *Oryza longistaminata*, que ha sido patentado (US 5859339 de Ronald et al, 1999), cuya característica es la resistencia a las quemaduras bacterianas que son una de las enfermedades más graves que pueden afectar al arroz. En cuanto a los agentes involucrados, el sistema reconoce las invenciones agro biotecnológicas ligadas a las prácticas de los agricultores tradicionales; un programa de Investigación en Arroz en la India determina su característica de resistencia, el Instituto Internacional de Investigación en el Arroz, en Filipinas determina el gen resistente y lo implanta en otras variedades de arroz. Una institución educativa y de investigación, la Universidad de California – Davis se encarga de aislar, clonar y obtener una patente del gen. El Fondo De Reconocimiento De Recursos Genéticos (GRRF por sus siglas en inglés) se creó para dar participación de los beneficios obtenidos por el uso comercial del gen a las comunidades locales de Malí y otros países en desarrollo.

En cuanto al funcionamiento u operación del esquema, se constituye un agente o un grupo de agentes como donantes (Malí y países poseedores de la especie de arroz), un agente titular de la patente sobre el gen, quien debe pagar un porcentaje de las ventas sobre los productos y derivados, por un espacio de tiempo dado; y el fondo como tal debe emplearse para dar becas a estudiantes de agricultura e investigadores de Malí, Filipinas y países en los que se encuentra la variedad de arroz.

11.3.2.2. El Patentamiento Del Conocimiento Tradicional En La India

Otro caso que puede ser útil como referente es el de patentamiento sobre el conocimiento tradicional en India. El producto natural al que se refiere este esquema de gestión es el de la planta *arogyapaacha*, que ha sido descubierta y utilizada en la medicina tradicional de la India, cuya característica esencial es la de constituirse como agente restaurador, anti – estresante, estimulante del sistema inmunológico.

Los agentes Involucrados son:

- La Tribu Kani (de Kerala, India), quien ha dado uso al compuesto en su medicina tradicional.

- El “Tropical Botanic Garden and Research Institute (TBGRI)”, quien actúa como desarrollador de la medicina sobre la base de los descubrimientos tribales (tres curanderos o “Plathis” divulgan sus secretos a los científicos, y éstos aíslan 12 componentes activos para desarrollar una medicina.

Este esquema de incentivos ha generado varias patentes para aplicaciones medicinales relacionadas con el sistema inmunológico:

- Patente de número 959/MAS/96 de Junio de 4 1996 y la patente número 88/Del/94.
- En una medicina para diabéticos (957/MAS/96 de Junio 4 1996 y una medicina deportiva 958/MAS/96 de Junio 4 1996).
- La empresa Arya Vaidya Pharmacy, Ltd. Obtiene la licencia para comercializar el producto.

11.3.2.3. El Fondo De Participación De Beneficios Monetarios y No Monetarios De Nigeria.

En este caso, el producto sujeto del esquema de protección e incentivos es el Dioscoretine, un compuesto activo, aislado a partir de tubérculos de la Dioscorea Dumetorum. Es un agente hipoglicémico, útil para el tratamiento a diabéticos que está patentado (Patente No. 5019580 de Iwu 1991). Los agentes participantes son los curanderos tradicionales, quienes hacían utilización y manipulación del compuesto inicialmente; el “descubridor”, que es el profesor Maurice M. Iwu, director del Bio-resources Development and Conservation Programme (BDCP) como parte del “International Cooperative Biodiversity Group (ICBG)”. Los mecanismos aplicados, de manera complementaria, son los siguientes:

- Patentes
- Secretos Comerciales: para la compañía Shaman Pharmaceuticals
- Copyright o Marca Registradas: sobre descripciones y citas,
- Fondo De Participación de Beneficios Monetarios y No Monetarios Establecido por la agencia BDCP

11.3.2.4. Las Licencias De “Know – How”

El instrumento denominado “Licencia de know-how” (Tobin 1997) toca un aspecto clave que puede aplicarse al caso de los agentes económicos naturales: la base para una licencia de know – how puede ser el hecho de que el recurso que es una

innovación natural tiene valor adicional por ser resultado de un proceso de I+D, no solo por existir como recurso natural.

Este tipo de licencia ha sido aplicado en el Perú, involucrando –como agentes participantes- a la tribu de los Aguarunas, de la Amazonia Peruana, quienes se encargan de la recolección y uso de plantas medicinales. Las Instituciones involucradas en el proyecto son:

- The International Cooperative Biodiversity Group Program (ICBG)
- Los Institutos Nacionales de Salud (Perú, USA)
- La Universidad de Washington (USA)
- The National Science Foundation (USA)
- The US Agency for International Development (USA).
- Searle & Co., una filial farmacéutica de Monsanto.

Su funcionamiento da inicio en el año de 1994, con la firma de una carta de intención; en 1996 empieza la participación formal de los Aguarunas y, después de una renegociación del esquema inicial que incluyó aspectos de negociación sobre recolección de la biodiversidad con la Universidad de Washington concernientes a la licencia de posesión de conocimientos con la Compañía Searle.

Los Aguarunas pretendían el control de los recursos argumentando que el recurso no tiene valor si no ha sido usado antes por la comunidad, con lo que el valor del recurso queda ligado al conocimiento y manejo desarrollados por la comunidad local: la licencia da acceso temporal a ese conocimiento por espacio de cuatro años, y los pagos corresponden tanto al valor colección como al valor de uso de los conocimientos, con lo que el comprador hace un pago por la obtención de muestras y un pago por el know – how, que se hace efectivo cuando el producto sea vendido en el mercado.

En este caso, con las licencias de know-How, se cuenta con un esquema de incentivos, un instrumento de gestión que considera los derechos de uso, venta, y transferencia.

11.3.2.5. Las Reservas De Extracción

Las reservas de extracción se implementaron en la amazonia brasilera con el propósito de hacer congruentes los objetivos de conservación y desarrollo. Combinan la propiedad pública con el uso colectivo de los recursos naturales. El instrumento fue propuesto por la comunidad y tiene cobertura para los productos

no madereros. El esquema de operación del instrumento tiene como base la estructura de derechos de propiedad, en la que el estado posee los derechos de propiedad sobre la tierra y otorga concesiones a las comunidades locales; por su parte, las comunidades locales reciben una concesión para el uso de recursos naturales y, finalmente, existen unidades individuales de tierra, de tal manera que cada hogar maneja su propia actividad de extracción y cultivo la apropiación de beneficios es privado e individual.

Los hogares pueden vender (y apropiarse) el valor de la producción de productos de extracción, pero no pueden vender la tierra ni el derecho de uso de ésta. Como restricciones al funcionamiento real del sistema, debe tenerse en cuenta que:

- El número de productos que son explotados comercialmente es limitado,
- La población involucrada sigue en estado de pobreza,
- Además debe soportar la competencia que representan los sustitutos cultivados,
- Además la extracción depende de la ayuda externa.

Un sistema similar es el llamado GELOSE (denominado así por la expresión "gestion locale sécurisée). Se trata de un contrato que parte de una decisión unilateral de transferencia de derechos por parte del gobierno a comunidades locales, con exclusión de derechos a otros agentes que no pertenezcan a estas comunidades.

Los pasos usuales para la puesta en marcha son:

- 1.- Demanda de parte de la comunidad local
- 2.- Se obtiene información acerca de los usos de la tierra y la explotación de los recursos, con la ayuda de un mediador
- 3.- Redacción del contrato
- 4.-Determinación de mecanismos de control y sanción para asegurar el cumplimiento

Estos esquemas demuestran que existen diferentes posibilidades de manejo de la biodiversidad, aplicando sistemas de derechos de propiedad estatal con cesión para los agentes locales.

11.3.2.6. Registros De Biodiversidad

Los Registros Populares de Biodiversidad PBR (por su denominación en inglés como "People's Biodiversity Registers"), son un mecanismo que se considera como requisito para tener un derecho de Propiedad intelectual y tienen un alcance

limitado porque mucha de la información es pública y es de libre acceso para las empresas; involucran beneficios monetarios y no monetarios. Entre los beneficios monetarios se cuentan:

- Pagos por recolección de muestras
- Pagos cuando el producto sea llevado al Mercado
- Royalty de largo plazo o fondo de participación que permita compensar a comunidades no participantes en el contrato inicial.

Entre los beneficios no monetarios se incluyen premios, felicitaciones, derechos de regulación del acceso al material natural recolectado. Este instrumento podría aplicarse al conocimiento del capital natural, de manera análoga, si las premisas se aplican a un agente económico natural.

En cuanto a su operación, se divide en fases de la siguiente manera:

- Documentación del conocimiento y prácticas comunales respecto de las especies salvajes y domesticadas
- Planeación participativa acerca del uso sostenible del recurso.
- Resolución del gobierno local aprobando estas decisiones
- Reconocimiento a los curanderos, agricultores o pescadores tradicionales para reconocer su dignidad social
- Dar publicidad al proceso
- Construcción de bases de datos electrónicas

Algunas de las lecciones que puede ofrecer la aplicación de este instrumento son resumidas a continuación:

- El conocimiento tradicional puede protegerse de la erosión, el agotamiento y la “bio piratería” a través de su publicidad, no a través de su mantenimiento en secreto.
- Los PBR son reforzados por mecanismos de incentivo social (por ejemplo la felicitación o el reconocimiento a través de premios).
- Las bases electrónicas de datos contribuyen a dar reconocimiento al valor de las innovaciones propias del conocimiento tradicional.

11.4. Especificidades A Tener En Cuenta En El Caso De la Protección De Las Tecnologías Naturales.

Haciendo una analogía con los esquemas de protección referidos a conocimientos de comunidades y agentes locales o indígenas (quizá lo más parecido, a efectos prácticos de encontrar las posibilidades de aplicación, al conocimiento del capital

natural), encontramos que efectivamente es viable el diseño de instrumentos específicamente pensados para proteger el conocimiento proveniente del capital natural, probablemente a través de instrumentos como las licencias de know-how, o las patentes compartidas en fondos mixtos (propiedad pública, manejo privado). La sugerencia que puede hacerse, derivada del análisis presentado aquí, es que éstos podrían mejorar la situación de los generadores locales de conocimiento e indígenas pero, adicionalmente haría falta un mecanismo específico que realice algún tipo de compensación al innovador natural. Incluso si la aplicación de un mecanismo de este tipo hiciese necesaria la definición jurídica el concepto de conocimiento del capital natural o el de innovación o invención natural, la tarea no sería menos difícil que la de definir el término “conocimiento tradicional”. En junio de 1998, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual “World Intellectual Property Organisation” (Wipo) declara que planea extender los derechos de propiedad intelectual a los poseedores de conocimientos tradicionales, las comunidades locales y los indígenas (Mauro y Hardison 2000).

En el caso de la interacción entre agentes humanos y naturales, teniendo en cuenta que el contrato no se ejecuta entre “iguales” sino en un contexto de principal-agente, es necesario pensar en el diseño de contratos específicos; pes, como se ha mostrado, los agentes naturales son un sujeto tangible y además sería posible identificar cuáles son los derechos de cada agente. El proceso de intercambio entre los agentes naturales y humanos implica la existencia de un contrato implícito que debe hacerse explícito.

Tal contrato podría suscribirse para un agente “proveedor” que tiene derecho a recibir los retornos o compensación por su aporte y un “receptor” que tiene derecho al uso del recurso (un bien o servicio proveniente del capital natural). El receptor puede ser un agente proveniente de una comunidad tradicional (curandero, agricultor, pescador), o un agente del circuito comercial e industrial (científico, criador de plantas, ingeniero, etc).

La Wipo ha resumido los elementos mínimos o básicos que debe tener un contrato en el caso del conocimiento tradicional (al respecto puede verse: Wipo 2002):

- Las partes contratantes
- El alcance del contrato
- Los derechos y obligaciones del proveedor del recurso genético
- Los derechos y obligaciones del recipiente
- Mecanismos de resolución de conflictos

Además, sería posible ofrecer una definición tentativa del “naturfacto”, de la tecnología natural, o del tipo o tipos de capital natural (bioinspiración, biomimética,

bioutilización individualmente consideradas o superpuestas) en los que se basa una tecnología, bien o servicio desarrollado por los humanos. Dicha definición podría hacerse operativa, siguiendo con la analogía el conocimiento proveniente del capital natural y el aprendizaje y acumulación de conocimientos propio de las comunidades locales.

Las dificultades en la caracterización del conocimiento tecnológico que reside en la naturaleza, el cual es aprovechado a través del flujo de aprendizaje desde el capital natural que en este trabajo hemos abordado, pueden atenuarse esta forma de conocimiento peculiar, observando algunas de las recomendaciones hechas por la Wipo en relación a las formas de conocimiento tradicional (Wipo 2006), según la cual:

- La denominación de “tradicional” que se da a esta forma de conocimiento se refiere a la manera de producirlo en las comunidades locales e indígenas. Puede decirse, entonces, que el conocimiento del capital natural se refiere al proceso de producción de tal conocimiento, sin intervención directa de agentes humanos, en principio.
- El sistema de patentes se basa más en el descubrimiento, que en la fecha en la que se realizó la invención y ese criterio puede aplicarse a las invenciones naturales:

“La novedad, en general, ha sido definida por las leyes de acuerdo con criterios más o menos precisos, respecto de la parte específica de conocimientos técnicos que se haya puesto a disposición del público. En el ámbito de las patentes, por ejemplo, es la divulgación (o su ausencia) la que establece si la condición de novedad (y de actividad inventiva) se ha cumplido. La fecha en que se realizó la invención apenas se toma en cuenta para tal fin. Sin embargo, esto no constituye un criterio absoluto, aún en el campo de las patentes. Es un hecho bien conocido que unos pocos estados miembros de la OMPI han aceptado ampliar la protección de patente a ciertas invenciones que han sido patentadas en otros países, siempre que esas invenciones no hayan sido objeto de utilización comercial. Una noción similar a la de "novedad comercial" se encuentra en el campo de la protección de las variedades de plantas *sui generis*”. (Wipo 2002:14).

- Es creado y sostenido de manera colectiva (lo mismo puede decirse del conocimiento del capital natural, que es creado por las especies, en procesos de interacción que ocurren en los ecosistemas):
- El hecho de que los creadores, inventores o poseedores del conocimiento tradicional no sean fácilmente identificables no es una condición que impida

necesariamente la aplicación de los sistemas de derechos de propiedad existentes.

- Tanto el conocimiento proveniente del capital natural, como el conocimiento tradicional son activos susceptibles de protección mediante sistemas de derechos de propiedad aunque son entidades colectivas; pero esta situación también ocurre con frecuencia en los procesos de tradicionales de innovación, en los que los nuevos productos o los conocimientos, en muchos casos, son propiedad de entidades colectivas (un ejemplo de ello pueden ser las grandes corporaciones empresariales).
- El sistema de patentes no protege necesariamente a los inventores sino a las invenciones en sí mismas (un ejemplo es el sistema de copyright, que no protege a los autores sino a sus trabajos).
- El conocimiento tradicional es de naturaleza integrada, por lo que es difícil crear protección para componentes separados; lo mismo puede decirse del conocimiento generado por los agentes económicos naturales.

Frente a los agentes locales (indígenas, curanderos, campesinos, etc.) la WIPO destaca cuatro características que deberían ser tenidas en cuenta:

En primer lugar, el conocimiento de los curanderos tradicionales debe:

- Registrarse en bases de datos
- Tener derechos frente a la posibilidad de reproducción o fijación de los elementos artísticos y literarios que contiene
- Tener derechos frente al uso de los elementos técnicos que posee, sin que sea una condición necesaria la provisión de una fórmula de parte del agente indígena o local.

En segundo lugar, generalmente proviene de un proceso de desarrollo incremental al interior de las comunidades, como respuesta a un medioambiente cambiante e implica tanto aspectos culturales como técnicos; además de tener un carácter sistémico, básicamente no formal (es, en buena medida, conocimiento tácito).

Como hemos sugerido, los agentes naturales crean tecnologías y realizan transacciones con los agentes humanos en el contexto de un contrato desigual: es importante tener en cuenta que, de hecho, cada transacción es de hecho una transferencia de derechos. La tarea de hacer el mercado de tecnologías naturales más transparente, más eficiente, implica que algún agente (el gobierno, las

empresas o los consumidores) debe pagar por esa transferencia de derechos. Desde el punto de vista técnico, la solución más recomendable es que el pago lo haga quien aprovecha directamente esos derechos. Las experiencias internacionales demuestran que los esquemas mixtos pueden ser aplicados, con participación de los diversos agentes involucrados.

Acciones necesarias:

- Debe reconocerse el derecho de los ecosistemas o las especies sobre sus aportes tecnológicos
- Debe aplicarse un sistema de información adecuado
- Deben diseñarse sistemas de aplicación de instrumentos

Una de las alternativas es la de aplicación de un sistema mixto (con participación de agentes privados y públicos) en el que el estado sea el “custodio” o “representante” de los derechos, representando así los intereses del productor natural.

Los derechos deben proteger los intereses del productor, que están dados por su función objetivo, cuyos argumentos son la “aptitud”, “la biodiversidad” y la “biomasa”. El esquema propuesto debe tener capacidad doble: de una parte, prevenir del uso indebido, y de la otra, incentivar el uso adecuado. Así el estado o los sistemas internacionales de protección tienen que desempeñar necesariamente un papel en cualquier sistema que sea viable.

Al igual que en el caso del conocimiento tradicional, puede pensarse en dos posibles aproximaciones frente a la duración de los derechos de propiedad intelectual aplicables a los agentes naturales:

- Atendiendo a la naturaleza del bien a proteger; una opción utilizada generalmente en los sistemas legislativos nacionales, en los que la protección del conocimiento tradicional se hace por unos períodos de tiempo indefinidos, en reconocimiento a la naturaleza incremental de este tipo de conocimiento y el reconocimiento de que son necesarios largos períodos de tiempo para que se produzca una aplicación comercial
- En referencia a su explotación comercial; si el punto de partida es la aplicación comercial, se emplean sistemas de un número limitado de años que pueden ser renovables, teniendo en cuenta que puede ocurrir la obsolescencia.

El camino más razonable, probablemente, es la combinación entre las dos modalidades; debería tenerse en cuenta que la segunda tiene más sentido

económico, puesto que al ocurrir la obsolescencia tecnológica en el mercado, el agente humano deja de usar el naturfacto y no tiene sentido que el mecanismo deje indefinido el tiempo de duración de los derechos. La opción más razonable sería la de definir duraciones diferentes. El tiempo de protección seguramente debe estar relacionado de manera inversa con su potencial de explotación comercial.

En el caso del aprovechamiento de las tres formas de conocimiento asociado al capital natural, el uso de aproximaciones biomiméticas, bioinspiradas o la bioutilización de tecnologías naturales por parte de científicos adscritos a organizaciones de carácter público podría apelar a las licencias de uso con duración muy larga, en función de la duración de los procesos de investigación básica.

En el caso de las comunidades tradicionales, podría aplicarse alguna modalidad de licencias de uso de larga duración, en función del carácter incremental de los procesos de ensayo y error que caracterizan a sus métodos de búsqueda.

En el caso de las compañías, podrían aplicarse licencias de corta o mediana duración, pero renovables, siguiendo criterios de aplicación y venta en el mercado.

El marco de acción delineado en este trabajo se orienta hacia alguna modalidad de patentamiento sobre recursos o procesos biológicos en favor de los agentes naturales más que hacia la prohibición de uso de los mismos, pues la mera prohibición sería ineficaz en situaciones en las que la relación económica de intercambio *sui generis* que hemos descrito entre los agentes naturales y los agentes económicos está presente, en la que el elemento intangible de “conocimientos” y las características de “no codificado” pueden ser predominantes. Hablamos de una patente en el sentido esencial del término que es el de dar monopolio al productor, para proteger su innovación, lo que hace que no necesariamente debamos estar presos de los requisitos usuales para las patentes que son los de novedad, aplicación.

Respecto de los sistemas de derechos de propiedad, estos se aplican en casos en los que debe mantenerse un nivel eficiente de inversión en un activo económico. Este es el caso que nos ocupa, dado que se trata de un sistema natural que cumple una función económica de innovación, además de las tradicionales medidas defensivas de política económica, debemos asegurar un conjunto de incentivos que tener en cuenta la dinámica de los agentes económicos naturales, es decir, que permita que, tanto el agente natural como el humano, alcancen los resultados que persiguen.

En aquellos casos en los que el producto proveniente del sistema natural es una idea, un diseño (en nuestro caso, una solución tecnológica), generalmente se

encuentra incorporada en el producto (organismo). Tras el proceso de intercambio con el sistema económico humano, el productor humano puede usar, copiar, modificar, emular la idea sin retribuir al agente natural. En este caso necesitamos un sistema de derechos de propiedad intelectual porque se presenta una situación no óptima: el “comprador” humano –en este mercado en el que la relación con el “vendedor” es asimétrica- asume automáticamente el derecho de explotar económicamente el producto natural sin reconocer la inversión que hizo el productor original.

El resultado indeseable consiste en que el incentivo económico que recibe el productor natural no es el adecuado: por ejemplo, se degrada el activo natural específico, pero no se invierte (en especie, aportando nutrientes, abono, protección, por ejemplo) para mantener su capacidad productiva.

Es necesario, en consecuencia, pensar en un sistema que restaure, distribuya o asigne los derechos de propiedad en ese mercado; que es el mercado de soluciones tecnológicas.

La naturaleza de los naturfactos, como activo del tipo “bien público”, nos refiere a la idea de valor de la biodiversidad como un activo que debe ser “asegurado” colectiva o globalmente, y que requiere de la implementación de instituciones que permitan ese proceso de aseguramiento.

Es preciso determinar qué tipo de agente o institución debe representar los derechos de propiedad asociados a las tecnologías naturales, considerando que el conocimiento generado por los agentes naturales tiene características de bien público, que requiere de una combinación de mecanismos de protección relacionados con prácticas de extracción. Dado que están localizados –por ejemplo en reservas naturales establecidas- y también deben ser cobijados por esquemas de propiedad intelectual; en aquellos casos en los que no están localizados geográficamente, por lo que su protección e incentivo debe ser institucional (por ejemplo podría apelarse a una institución de protección multilateral que pueda utilizar mecanismos tales como los acuerdos y tratados internacionales).

Al respecto, en su análisis de las condiciones teóricas y de economía política que permiten el diseño de tratados medioambientales internacionales, Wagner(2001) encuentra que los acuerdos medioambientales internacionales se han constituido como una herramienta importante en la solución de los problemas en los que están implicados “recursos comunes”, pero afrontan un dilema básico: la soberanía nacional impide la ejecución o imposición externa de sanciones, por lo que deben ser auto impuestos. Concluye que la teoría económica demuestra que la posibilidad de aplicar castigos en situaciones de externalidad ambiental es restringida por factores políticos y tecnológicos, razón por la cual deben incluirse instrumentos

estabilizadores adicionales (transferencia de recursos, sanciones comerciales, cooperación en I+D, deuda externa, etc.).

Desde el punto de vista de la implementación de los acuerdos o tratados ambientales internacionales, Furman et. al (2007) abordan los retos relacionados con la discrepancia existente entre los objetivos de la política de conservación o protección de la biodiversidad y las prácticas propias de las comunidades locales, y se preguntan cuál es la manera apropiada para reconciliar los diseños de políticas globales con la efectiva participación de las comunidades locales; finalmente encuentran que es recomendable la incorporación de las prioridades, objetivos regionales y locales en las políticas que usualmente son concebidas a partir de un enfoque “top – down”, soslayando la compleja interacción de factores sociales, culturales, económicos y ecológicos.

En su revisión de los acuerdos de protección ambiental, Sand (2001) realiza un balance de las lecciones aprendidas a partir de cien años de implementación de tales acuerdos, y subraya la necesidad de implementar innovaciones institucionales que mejoren la gobernanza, la efectividad de tales acuerdos. Además de las técnicas de gestión ambiental, los tratados y acuerdos han significado un valioso aporte en términos de la consolidación de un consenso internacional acerca de los objetivos de conservación de la naturaleza. Algunas de las debilidades asociadas a este tipo de acuerdos se relacionan con las dificultades para su implementación, el monitoreo o el cumplimiento forzoso. Para Sand, es necesaria la transición desde el paradigma de la soberanía permanente sobre los recursos naturales, dado el debilitamiento que la soberanía nacional está experimentando en favor de esquemas políticos federales o de integración comercial, para pasar a esquemas basados en nociones como las de “tutela pública” y “custodia” de los recursos naturales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Accinelli, Elvio (2001). "Economías singulares," *Lecturas de Economía*, Universidad de Antioquia, Departamento de Economía, issue 54, pp. 7-33, Enero-Jun.

Abdelmalek, Maged (2013): The application of biomimetic design approaches for renewable energy generation. University of Toronto. Department of Mechanical and Industrial Engineering.

Adams, David (2011): *Effective Learning in the Life Sciences: How Students Can Achieve Their Full Potential*. Hoboken: John Wiley & Sons.

ACEEE (2011): Biomimicry in New York State. Summer Study on Energy Efficiency in Industry, pp. 1-13.
<https://www.aceee.org/files/proceedings/2011/data/papers/0085-000024.pdf>

ADM Associates (2012): Evaluation of Envirogrid™ Technology performance. Final Report, pp. 1-51, Sacramento.

Aghion, Philippe y Howitt, Peter (1990): A Model of Growth through Creative Destruction. NBER Working Paper No. 3223, pp.1-48.

Aghion, Philippe y Howitt, Peter (1998): *Endogenous Growth Theory*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology MIT press.

Agree, Peter y Borgnia, Mario (1998): "The Aquaporins, Blueprints for Cellular Plumbing Systems". *Journal of Biological Chemistry*. Vol. 273, No. 24, pp. 14659–14662

Ahond, Alain; Laboute, Pierre; Laurent, Dominique; Potier, Pierre; Poupat, Christiane; Pusset, Jacques; Pusset, Michele y Thoison, Odile (1989): Patente No. 4801602 A. Estados Unidos.

Alexander, James; Gaston, Kevin y Balmford, Andrew (1999). Balancing The Earth's Accounts. *Nature*. Vol. 401, pp. 323-324.

Allison, David; Dufrêne, Yves; Doktycz, Mitchel y Hildebrand Mark (2008): Biomineralization at the Nanoscale: Learning from Diatoms. En Jena, Bhanu. *Methods in Nano Cell Biology*. Burlington: Academic Press, pp. 61-86.

Amendola, Mario; Froeschlé, Claude; Gaffard, Jean y Elena, Lega (1996): Cyclical Growth And Primary Resource Constraint. En Faucheux, S; Pearce, D y Proops, J (1996): *Models of Sustainable Development*. London: Edward Elgar Publishing, pp. 176-186.

Andersen, Esben (1994): *Evolutionary Economics: Post Schumpeterian Contributions*. London: Pinter Publishers Ltd.

Anderson, John (2002): *The Airplane, a History of Its Technology*, Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Ankenbauer, Waltraud; Greif, Michael; Laue, Frank y Sobek, Harald (2001): *Patente No. 2001023583 A3*. World Intellectual Property Organization Wipo.

Arnold, Hans-Joachim; Arnold, Günther; Cesnik, Gerhard y Remschnig, Simon (2012): *Patente n° 102011103132 A1*. Alemania.

Arrow, K (1962): *Economic Welfare and the Allocation of Resources for Inventions*. In *The Rate and direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Arrow, Kenneth; Daily, Gretchen; Dasgupta, Partha; Levin, Simon; Mäler, Karl-Göran; Maskin, Eric; Starrett, David; Sterner, Thomas y Tietenberg, Thomas (1999): *Managing Ecosystem Resources*. Beijer Institute, pp. 1-20.

Arrow, Kenneth; Dasgupta, Partha; Goulder, Lawrence; Daily, Gretchen; Ehrlich, Paul; Heal, Geoffrey; Mäler, Karl; Schneider, Stephen, Starrett, David y Walker, Brian (2004): *Are We Consuming Too Much?* *Journal of Economic Perspectives*. Vol. 18, No. 3, pp. 147–172.

Arthur, Brian (1989): *Competing Technologies, Increasing Returns And Locked-In By Historical Events*. *The Economic Journal*. Vol.99, No. 394, pp. 116-131.

Asafu-Adjaye, John (2003): *Biodiversity Loss and Economic Growth: A Cross-Country Analysis*. *Contemporary Economic Policy*. Vol. 21, No. 2, pp. 173-185.

Augugliaro, Vincenzo y Palmisano, Leonardo (2010): *Green Oxidation of Alcohols to Carbonyl Compounds by Heterogeneous Photocatalysis*. *ChemSusChem*. Vol. 3, Tema 10, pp. 1135–1138.

Badimon, Lina (2011): *“Introducción: estatinas y salud cardiovascular”*. *Revista Española Cardiología*, Vol 11B, pp. 1-2.

Bagnoli, Philip (2003): *Perverse Incentives in Biodiversity Loss*. Organisation for Economic Co-Operation and Development-Environment Directorate -Environment Policy Committee Working Party on Global and Structural Policies. En Working Group on Economic Aspects Of Biodiversity.

Bagnoli, P; Goeschl, Timo y Kovacs, Eszter (2008): *People and Biodiversity Policies Impacts*. En Bagnoli P, Goeschl T, Kovacs E (2008). *Issues and Strategies for Policy Action: Impacts, Issues and Strategies for Policy Action*. OECD Publishing, pp. 1-249.

Baird, George (2001): *The Architectural Expression of Environmental Control Systems*. London: Taylor & Francis.

Balasko, Yves (1978): Economic Equilibrium And Catastrophe Theory: An Introduction. *Econometrica*. Vol, 46, No. 3, pp. 557-569.

Baleen Filters Pty Limited (2007): Wastewater: Cleaning biological wastewater the natural way. *Filtration+Separation, Application*, pp. 38-39.

Barbier, Edward y Markandya, Anil (1990): The conditions for achieving environmentally sustainable development. *European Economic Review*. Vol. 34, No.2, pp. 659-669.

Bar-Cohen, Yoseph (2006): *Biomimetics Biologically Inspired Technologies*. California: Taylor & Francis.

Bar-Cohen, Yoseph (2011): *Biomimetics: nature based innovation*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Barnes, Wayne (1995): Patente No. 5436149 A. Estados Unidos.

Barnett, Harold y Morse, Chandler (1963). *Scarcity and Growth: The Economics of Natural Resource Availability*. Baltimore: Johns Hopkins University Press for Resources for the Future.

Barrales, Hebert y De la Rosa, Raqueline (2014): Uso de hongos endófitos en la producción del fármaco anticáncer Taxol. *Biotecnología Vegetal*, Vol. 14, No. 1, pp. 3 – 13.

Barrios-González, Javier y Miranda, Roxana (2010): Biotechnological production and applications of statins. *Application Microbiology Biotechnology*. No. 85, pp. 869–883.

Basalla, George (1991): *La evolución de la tecnología*, Barcelona: Crítica.

Bartelmus, Peter (1997): Whither economics? From optimality to sustainability? *Environment and Development Economics*, Vol.2, pp 323-345.

Bartelmus, Peter (1999): Sustainable development: Paradigm or paranoia? *Wuppertal papers*, No. 93, pp. 1-12.

Barthlott W. (1990): Scanning electron microscopy of the epidermal surface in plants. Claugher D, ed. Oxford: Clarendon Press.

Barthlott W. (1990): Patente n° 6660363 B1. Estados Unidos.

Barthlott W. (2003): Patente n° 6660363 B1. Estados Unidos

Barthlott, W y Ehler N (1977): Scanning electron microscopy of epidermal surfaces of Spermatophyta. *Tropische und subtropische Pflanzenwelt* Vol.19, pp. 364-467.

Barthlott W y Neinhuis C. (1997): Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, No.202, pp.1-7

Barthlott W y Neinhuis C. (2000): Patente n° 2000058410 A1. Organización Mundial de Propiedad intelectual (WIPO).

Barthlott W, Wollenweber E. (1981): Zur Feinstruktur, Chemie und taxonomischen Signifikanz epicuticularer Wachse und ähnlicher Sekrete. *Tropische und Subtropische Pflanzenwelt* Vol.32, pp.7-67.

Bartholomew, Alick (2004): *Hidden Nature: The Startling Insights of Viktor Schauberg*. Edinburgh, Scotland: Floris Books.

Baubet, Valerie; LeMouellic, Hervé y Brulet, Philippe (2004): Patente No. 6800492 B2. Estados Unidos.

Bayer, Eben y McIntyre, Gavin (2011): Patente n° 8001719 B2. Estados Unidos.

Bayon, Ricardo; Lovink, Steven y Veening Wouter (2000): *Financiamiento De La Conservación De La Biodiversidad*. Banco Interamericano De Desarrollo, Washington: Serie De Informes Técnicos Del Departamento De Desarrollo Sostenible.

Beckenbach, Frank y Pasche, Markus (1996): Non-Linear Ecological Models And Economic Perturbation: Sustainability As A Concept Of Stability Corridors. En Faucheaux, S; Pearce, D y Proops, J (1996). *Models of Sustainable Development*. Brookfield: Edward Elgar, pp. 278-301.

Benedict, Christine (2002): *Bioadhesives: Biocatalysis, post translational modification*. En Committee on Marine Biotechnology: Biomedical Applications of Marine Natural Products, National Research Council. Marine Biotechnology Workshop: Biomedical Applications of Marine Natural Products: Agenda. Session 3: biomaterials and bioengineering. Washington: The National Academies.

Benedict, Christine y Chaturvedi, Nishith (1990): Patente No. 4908404. Estados Unidos.

Benedict, Christine y Picciano, Paul (1991): Patente No. 5015677. Estados Unidos.

Benhaïm, Jaques y Schembri, Patrick (1996): Technical Change: An Essential Variable In The Choice Of A Sustainable Development Trajectory. En Faucheaux, S; Pearce, D y Proops, J (1996): *Models of Sustainable Development*. London: Edward Elgar Publishing, pp. 123 – 149.

Benitez, José; Solloso Andres; Marchante, Carmen; Marta, Urquijo; Queral, Daniel; Domingo Mercedes y Palomera, Fernando (2007): Patente No. 2007054748 A1. World Intellectual Property Organization Wipo.

Bengt-Åke Lundvall (2007): National Innovation Systems—Analytical Concept and Development Tool. Industry and Innovation, Taylor & Francis Journals. Vol. 14, No.1, pp. 95-119.

Benyus, Janine (1997): Biomimicry. Innovation inspired by nature. New York: Harper-Collins Publisher Inc.

Benyus, Janine (2006): Biomimicry - Design Inspired by Nature. En The natural edge Project (2007): Principles and Practices in Sustainable Development for the Engineering and Built Environment Professions. <http://www.naturaledgeproject.net/ESSPCLP-Principles and Practices in SD-Lecture9.aspx>

Belko, John (2008): Novel Fan Design Offers Energy Savings to Refrigeration Market. International Appliance manufacturing. Resources. http://www.appliancedesign.com/ext/resources/AM/Home/Files/PDFs/30_AO%20Smith.pdf

Berkes, Fikret y Folke, Karl (1994). Investing in cultural capital for sustainable use of natural capital”. En Jannsson, A; Hammer, M; Folke, C y Costanza R (1994). Investing in Natural Capital: The Ecological Economics Approach to Sustainability. Washington: Island Press, pp. 128 – 149.

Bertino, Joseph; Medina, Daniel; Faircloth, Glynn; Mitsiades, Constantine; Anderson, Kenneth y Mitsiades, Nicholas (2008): Patente No. 7381703 B2. Estados Unidos.

Betke, Margrit; Hirsh, Diane, Makris, Nicholas; Mccracken, Gary; Procopio, Marianne; Hristov, Nickolay; Tang, Shuang; Bagchi, Angshuman; Reichard, Jonathan; Horn, Jason; Crampton, Stephen; Cleveland, Cutler y Kunz, Thomas (2008): Thermal imaging reveals significantly smaller brazilian free-tailed bat colonies than previously estimated. Journal of Mammalogy, Vol.89, No.1, pp.18–24.

Bhushan, Bharat (2009): “Biomimetics: lessons from nature: An overview”, Philosophical Transaction of the Royal Society, No 367, pp. 1445–1486.

Biomimicry Institute. Ask nature. Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de <http://www.asknature.org/strategy/970385c69bca10842fc3b731cdda937d#.VHtIBDGG8jY>

Bixler, Barry; Pease, David y Fairhurst, Fiona (2007): The accuracy of computational fluid dynamics analysis of the passive drag of a male swimmer. Sports Biomechanics. Vol.6, No. 1, pp. 81-98.

Bolckmans KJF (2008) De insectenfabriek. In: Osse J, Schoonhoven L, Dicke M, Buiters R (eds) *Natuur als bondgenoot: biologische bestrijding van ziekten en plagen*. Bio-Wetenschappen en Maatschappij, Den Haag.

Blount Inc (2004): Annual Report 2004, pp. 1-94.

Blount Inc (2006): Annual Report 2006, pp.1-90.

Blount Inc (2009): Annual Report 2009, pp. 1-88.

Blow, Nathan (2009): Biobanking: freezer burn. *Nature methods*, Vol. 6, No.2, pp. 173 – 178.

Blunt, John; Garcia, Dolores; Lake, Robin; Philibert, Marc Stephane y Gibson, Herbert (1990): Patente No. 0572109 B1.

Bond, Aaron (2006): “Exenatide (Byetta) as a novel treatment option for type 2 diabetes mellitus” *Proc (Bayl Univ Med Cent)*, Vol.19, pp.281–284

Bonser, Richard (2006): “Patented biologically-inspired technological innovations: a twenty year view” *Journal of Bionic Engineering*, pp. 39- 41.

Boulding. Kenneth (1966): *The Economics of The Coming Spaceship Earth*. En Jarrett (1997). *Environmental quality in a growing economy*. Baltimore: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press, pp. 3-14.

Boulding, Kenneth (1978): *Ecodynamics: A New Theory of Societal Evolution*, Beverly Hills: Sage Publications.

Boyd, Brewster; Henning, Nina; Reyna, Emily; Welch, Matthew y Wang, Daniel (2009): *Hybrid Organizations: New Business Models for Environmental Leadership*. Sheffield: Greenleaf Publishing.

Brainerd, Elizabeth (2001): Caught in the crossflow. *Nature, News and views*, Vol.412, pp. 387-388.

Bräse, Stefan y Banert, Klaus (2011): *Organic Azides: Syntheses and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom.

Brock, Thomas (1997): *The Value of Basic Research: Discovery of thermus aquaticus and Other Extreme Thermophiles*. Genetics Society of America. *Perspectives Anecdotal, Historical And Critical Commentaries on Genetics*. Vol.146, pp. 1207-1210.

Brock, Thomas y Freeze, Hudson (1969): *Thermus aquaticus* gen. n. and sp. n., a Nonsporulating Extreme Thermophile. *Journal of Bacteriology*.

Brody, Jonathan y Witkiewicz, Agnieszka (2010): Patente No. 2010107960 A1. World Intellectual Property Organization Wipo.

Bryan, Bruce y Szent-Gyorgyi, Christopher (2008): Patente No. 1064360 B1. Europa.

Bubb, Michael; Korn, Edward y Spector, Ilan (1995): Patente No. 1996001627 A1. World Intellectual Property Organization Wipo.

Buckingham, Steven (2011): Proteins from seeds solve storage issues: Stabilitech. Copying Nature. Lab Times. Biobusiness. No. 4, pp. 38-40.
http://www.labtimes.org/labtimes/issues/lt2011/lt04/lt_2011_04_38_40.pdf

Burnside, Beth; Mattes, Carol; McGuinness, Charlotte; Rudnic, Edward y Belendiuk, George (1999): Patente No. 5883103 A. Estados Unidos.

Bushan, B. y Dean, B (2010): Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. Philos Trans A Math Phys Eng Sci. Vol. 368, No.1929, pp-4775-4806

Cao, Xinmin; Guy, Graeme y Tan, Yin Hwee (1993): Patente No. 0551200 A1. Europa.

Carpi, Angelo y Brebbia, Carlos (2010): Design & Nature V: Comparing Design in Nature with Science and Engineering. Southampton: WIT Press.

Carreck, Norman, y Williams, Ingrid (1998): "The economic value of bees in the UK". Bee World, No. 79, Vol. 3, pp. 1-13.

Castañeda, Beatriz (1990): An index of sustainable economic welfare (ISEW) for Chile. Ecological Economics. Vol. 28, pp. 231 – 244.

Castro, Angelina; Ramos, Alfredo; Fernández, Felipe; Lombó, Carmen; Mendez, José; Salas, Ana y Velasco, Carmen (2008): Patente No. EP1925668 A2. Europa.

Cesnik, Gerhard; Remschnig, Simon; Arnold, Hans-Joachim; Arnold, Guenther y Krampl, Franz (2013): Patente n° 2013/0087720 A1. Estados Unidos.

Chegwin, Carolina; Nieto-Ramírez, Ivonne; Atehortúa, Lucía y Sepúlveda, Liuda (2012): Las estatinas: Actividad biológica y producción biotecnológica. Revista Colombiana de Biotecnología, Vo. XIV, No. 2, pp.157-178.

Cheng, Susanne (1996): Patente No. 5512462 A. Estados Unidos.

Chiang, Young-Meng y Chou, Hong-Nong (1994): Patente No. 5358858 A. Estados Unidos.

Choe, Yun Hwang y Greenwald, Richard (2001): Patente No. 2001021135 A2. World Intellectual Property Organization Wipo.

Choi, Youngik; Hayes, Donald y Johnson, Kraig (2007): Mathematical model for a batch aerated submerged biofilm reactor for organic carbon and nitrogen removal. Korean Journal of Chemical Engineering. Vol. 24, Tema. 4, pp.633-640.

Choi, Youngik; Johnson, Kraig; Hayes, Donald; Sung, Nak-chang; Xu, Hua (2010): Dissolved organic matter and nitrogen removal by advanced aerated submerged bio-film reactor, Desalination. Vol. 250, Tema 1, pp. 368-372.

Clegg, James (2001): Review Cryptobiosis a peculiar state of biological organization. Comparative Biochemistry and Physiology Part B. No.128, pp. 613-624.

Clement, Omoshile; Müller Rolf y Müller-Cohn, Judy (2010): A Warmer Reception. Cool Chain, Labs & Logistics, pp. 86-90.
http://www.biomatrica.com/downloads/EPC_article_Dec2010.pdf.

Cleveland, Cutler; Betke, Margrit; Federico, Paula; Frank, Jeff; Hallam, Thomas; Horn, Jason; López, Juan; McCracken, Gary; Medellín, Rodrigo; Moreno, Arnulfo; Sansone, Chris; Westbrook, John y Kunz, Thomas (2006): Economic value of the pest control service provided by Brazilian free-tailed bats in south-central Texas. Frontiers in Ecology and the Environment, Vol. 4, pp. 238–243.

Cobb, Clifford; Halstead, Ted y Rowe, Jonathan (1995): If the GDP is Up, Why is America Down? Atlantic Monthly 276.
<http://www.theatlantic.com/past/politics/ecbig/gdp.htm>

Comb, Donald; Perler, Francine; Kucera, Rebecca y Jack; William (1994): Patente No. 5322785 A. Estados Unidos.

Committee on Biomolecular Materials and Processes (2008): Inspired by Biology: From Molecules to Materials to Machines. National Research Council. Washington: The National Academies Press.

Condon, Malcolm (2003): Industrial Wastewater Filter Technology Inspired by Nature. Filtration+Separation, pp.18-21.

Constantz, Brent (2009): Patente n° 4880610 A. Estados Unidos.

Constantz, Brent (2009): Patente n° 2134300 A1. Europa.

Constantz, Brent y Clawson, Ben (2000): Patente n° 6149655 A. Estados Unidos.

Constantz, Brent y Delaney David (2007): Patente n° 20070299248 A1. Estados Unidos.

Constantz, Brent; Delaney, David y Yetkinler, Duran (2005): Patente n° 20050257714 A1. Estados Unidos.

Constantz, Brent; Delaney, David y Yetkinler, Duran (2013): Patente n° 8419803 B2. Estados Unidos.

Constanz, Brent; Fulmer, Mark y Barr Bryan (1994): Patente n° 5336264 A. Estados Unidos.

Constantz, Brent y Osaka, Gary (1992): Patente n° 5164187 A. Estados Unidos.

Constantz, Brent; Ryan, Cecily y Clodic, Laurence (2010): Patente n° 7735274 B2. Estados Unidos.

Constantz B; Ison I; Fulmer, M; Poser, R; Smith, S; VanWagoner, M; Ross, J; Goldstein, S; Jupiter, J y Rosenthal, D (1995): Skeletal repair by in situ formation of the mineral phase of bone. *Science*. No. 267, pp. 1796–1799.

Constanza, Robert; d'Arge, Ralph; De Groot, Rudolf; Farberk, Stephen; Grasso, Monica; Hannon, Bruce; Limburg, Karin; Naeem, Shahid; O'Neill, Robert; Paruelo, Jose; Raskin, Robert; Suttonk, Paul y Van den Belt, Marjan (1997): The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, Vol. 387, pp. 253-260.

Cook, Theodore (2014): *The curves of life*. London: Constable and Co

Cooper, Susan y Ginnett, Tim (1998): "Spines protect plants against browsing by small climbing mammals". *Oecologia*, No. 113, pp. 113-219.

Coppo, J.A (2008): "*Acuaporinas*". *Revista Veterinaria*. Vol.19, No. 2, pp.167–178.

Corey, Elias y Gin, David (1998): Patente n° 5721362. Estados Unidos.

Corey, Elias; Gin, David y Kania, Robert (1996): Enantioselective Total Synthesis of Ecteinascidin 743. *Journal American Chemical Society*. Vol 118, pp.9202-9203.

Cox, Joseph (1946): Patente n° 2622636. Estados Unidos

Craig, Catherine y Bernard, Gary (1990): Insect Attraction to Ultraviolet-Reflecting Spider Webs and Web Decorations. *Ecology*, Vol. 71, No. 2, pp. 616-623

Cragg, Gordon y Newman, David (2005): Plants as a source of anti-cancer agents. *Journal of Ethnopharmacology*. Vol.100, pp. 72–79.

Crites, Ronald; Middlebrooks, Joe; Bastian, Robert y Reed Sherwood (2014): *Natural Wastewater Treatment Systems*, 2nd edition. Boca Raton-Florida: CRC Press.Taylor & Francis Group.

Crowe, John; Crowe Lois; Wolkers, Willem; Oliver, Ann; Auh Joong-Hyuck; Tang, Minke; Zhu, Shijun; Norris, Jeffrey y Tablin, Fern (2005): Stabilization of Dry

Mammalian Cells: Lessons from Nature. Integrative and Comparative Biology, No. 45, pp. 810–820.

Crucible Group (1994): People, plants, and patents: the impact of intellectual property on biodiversity, conservation, trade, and rural society. Ottawa: International Development Research Centre IDRC.

Cvetković RS y Plosker GL (2007): “Exenatide: a review of its use in patients with type 2 diabetes mellitus (as an adjunct to metformin and/or a sulfonylurea)”. *Drugs*, No.67, Vol.6, pp. 935-54.

Dahl, Richard (2013): Cooling Concepts: Alternatives to Air Conditioning for a Warm World. *Environmental Health Perspectives*, No.121, Vol.1, pp.18-25.

Daly, Herman (1996): Beyond growth: the economics of sustainable development. Boston: Beacon Press.

Daly, Herman y Cobb, John (1993): Para el bien común: Reorientando la Economía hacia la Comunidad, el Ambiente y un Futuro Sostenible. Fondo De Cultura Económica.

Dane, Robert y Payne Edward (2010): Patente n° 7789723 B2. Estados Unidos.

Dama-Fakir, P; Toerien, A; Janisch C (2012): Looking to nature for solutions on water treatment. Water Institute of Southern Africa, Papers, pp. 1-10.
<http://www.ewisa.co.za/literature/files/ID174%20Paper325%20Dama-Fakir%20P.pdf>

Danish Hydraulic Institute DHI (2014): “Improved water desalination with aquaporin: Optimising membrane performance production with Computational Fluid Dynamics”. *DHI Case Story*. http://www.dhigroup.com/-/media/shared%20content/global/references/apac/case%20stories/improved%20water%20desalination%20with%20aquaporin%20-%20dhi%20case%20story%20dk%20sg_v1.3.pdf

Das, Suman y Cohly, Hari Har (1995): Patente No. 5401504 A. Estados Unidos.

Dasgupta, Partha (1995): Optimal development and the idea of net national product. En Goldin, I y Winters, A 1995. *The Economics of Sustainable Development*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 111-143.

Dasgupta, Partha (1996). *The economics of the environment*. Environment and Development Economics. Vol.1, pp 387-428.

Dasgupta, Partha y Mäler, Karl (1991): El Ambiente y los Nuevos Temas del Desarrollo. En *Desarrollo y medio ambiente: hacia un enfoque integrador*. Santiago de Chile: Ed. Joaquin Vial, pp. 25-46.

Dasgupta Partha y Heal, Geoffrey (1981): Economic Theory and exhaustible resources. Cambridge: Cambridge Economic Handbooks.

De Groot, Rudolf (1992): Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making. Groningen: Wolters-Noordhoff.

De Groot, Rudolf; Wilson, Matthew y Boumans, Roelof (2002): "A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services", Ecological Economics, No. 41, pp. 393–408.

De Groot, Rudolf; Stuij, Mishka; Finlayson, Max y Davidson, Nick (2006): Valuing wetlands Guidance for valuing the benefits derived from wetland ecosystem services. Ramsar Technical Report No. 3. CBD Technical Series No. 27, pp: 1-45.

De Groot, Rudolf; Brander, Luke; Ploeg, Sandervander; Costanza, Robert; Bernard, Florence; Braat, Leon; Christie, Mike; Crossman, Neville; Ghermandi, Andrea; Hein, Lars; Hussain, Salman; Kumar, Pushpam; McVittie, Alistair; Portela, Rosimeiry; Rodriguez, Luis; Brinkm, Patrickten y VanBeukering Pieter (2012): Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. Ecosystem Services, Vol.1, pp. 50–61.

Deke, Oliver (2008): Environmental Policy Instruments for Conserving Global Biodiversity. Berlin: Springer Science & Business Media, pp. 1-412.

De Mestral, George (1955): Patente n° 2717437 A. Estados Unidos.

David, P (1998): Common Agency and the Emergence of 'Open Science' Institutions. American Economic Review Papers and Proceedings. No.88, pp. 15 - 21.

Deshpande, Anjali; Goh, Aik; Goossens, Adriaan y Javdani, Saeed (2013): Biomimicry for coastal eco-cities. LRF Collegium Series, Vol. 4, pp.1-101.
<http://doc.utwente.nl/90711/1/Deshpande%20et%20al.%20-%202013%20-%20Biomimicry%20for%20coastal%20eco-cities%20Towards%20a%20Carbon%20Neutral%20Dover,%20UK.pdf>

Dettre, Robert; Jackson, Harold y Johnson, Rulon (1967): Patent n° US 3354022 A. Estados Unidos.

Dixon, J y Fallon, L (1991): El concepto de sustentabilidad: sus orígenes, alcance y utilidad en la formulación de políticas. En Desarrollo y medio ambiente. Santiago de Chile: Ed. Joaquín Vial, CIEPLAN.

D'Incalci, Maurizio y Galmarini, Carlos (2010): A review of trabectedin (ET 743) A unique Mechanism of Action. Molecular Cancer Therapeutics.Vol. 9, No.8, pp.2157-2163.

Dorozhkin, Sergey (2009): Calcium Orthophosphate Cements and Concretes. Materials, No.2, pp.221-291.

Drack, Manfred y Gebeshuberbc, Ille. (2013): "Comment on "Innovation through imitation:biomimetic, bioinspired and biokleptic research". Soft Matter, pp.2338–2340.

Drew, Jeff (2008): Patente n°20080152673A1. Estados Unidos.

Drewitt A y Langston R (2008): Collision effects of wind-power generators and other obstacles on birds. *Annals of the New York Academy of Sciences*, No.1134, pp.233–266.

Dunster, A (2007): Naturally innovative. Using biomimetics in construction, Information Paper No.11, Vol.7, Bracknell, United Kingdom.

Eilenberg, J; Hajek, A y Lomer, C (2001): Suggestions for unifying the terminology in biological control. *Biocontrol*. Vol. 46, Tema. 4, pp.187-400.

Emerton, L (2000): Using economic incentives for biodiversity conservation. Gland: IUCN.

Endo, Akira (2004): The origin of the statins. International Congress Series 1262, pp. 3 – 8.

Endo, Akira; Kuroda, Masao; Terahara, Akira; Tsujita, Yoshio y Tamura, Chihiro (1977): Patente No. 4049495 A. Estados Unidos.

Eng, John (1995): Patente n° 5424286 A. Estados Unidos.

Eng, John; Kleinman, Wayne; Singhll, Latika; Singh, Gurcharn y Raufman, Jean-Pierre (1992): Isolation and Characterizationo f Exendin-4, an Exendin-3 Analogue, from Heloderma suspecturn Venom. *The Journal of Biological Chemistry*. Vol. 267, No. 11, pp. 7402-7406.

England, Richard (2000). Natural Capital and the Theory of Economic Growth. *Ecological Economics*. Vol. 34, pp. 425–431.

Environmental Design Research Association EDRA. (2009): A Phenomenological Interpretation of biomimicry in two sustainable Designs. Proceedings of the 40th Annual Conference of the Environmental Design Research Association EDRA, pp. 39-47. Kansas City.

Erba, E; Bergamaschi, D; Bassano, L; Damia, G; Ronzoni, S; Faircloth, G y D'Incalci, M (2001): Ecteinascidin-743 (ET-743), a natural marine compound, with a unique mechanism of action. *European Journal of Cancer*. Vol. 37, pp. 97-105.

European Science Foundation (2010): Marine Biotechnology: A New Vision and Strategy for Europe. Marine Board-ESF Position Paper 15, pp. 1-96.

Faber, Malte y Proops, John (1990): Evolution, Time, Production and the Environmental. Heidelberg: Springer- Verlag

Fagerberg, J; Mowery, D y Nelson, R(2006): The Oxford Handbook of Innovation. En Fagerberg, Jan; Mowery, David y Nelson, Richard (2006). Oxford Handbooks, pp 656.

Faircloth, Glynn; Nuyen, Bastian; Ruffles, Graham y Weitman, Steve (2002): Patente No. 2002036145 A2. World Intellectual Property Organization Wipo.

Faircloth, Glynn; Paz-Ares, Luis y Twelves, Chris (2009): Patente No. 20090298752 A1. Estados Unidos.

Fairhurst, Fiona; Cappaert, Jane y Okada, Masanobu (2002): Patente n° D456111 S1. Estados Unidos.

Fairhurst, Fiona y Cappaert, Jane (2008): Patente n° D456111 S1. Estados Unidos.

Faucheux, S; Pearce, D y Proops, J (1996): Models of Sustainable Development. London: Edward Elgar Publishing.

Fenical, William y Jacobs, Robert (1997): Patente No. 5624911 A. Estados Unidos.

Fernández Díaz Andrés (1994). La Economía De La Complejidad: Economía Dinámica Caótica, McGraw – Hill.

Fernández-Díaz, Andrés; Gámir, Parejo; Rodríguez José Alberto y Sáiz, Luis (1999): Política Económica. 2da Edición. Madrid: Mcgraw-Hill Interamericana.

Fish, F (2006a): “The myth and reality of Gray’s paradox: implication of dolphin drag reduction for technology”. *Bioinspiration & Biomimetics*. Vol. 1, pp 17–25. <http://darwin.wcupa.edu/~biology/fish/pubs/pdf/2006B%26BGray'sParadox.pdf>

Fish, F (2006b): “Limits of nature and advances of technology: What does biomimetics have to offer to aquatic robots?” *ABBI*, Vol. 3 No. 1, pp. 49-60. <http://darwin.wcupa.edu/~biology/fish/pubs/pdf/2006ABBLimits.pdf>

Fish F (2009): “Biomimetics: Determining engineering opportunities from nature”. *Biomimetics and Bioinspiration*, edited by R Martín, A Lakhtakia, Vol. 7401. <http://darwin.wcupa.edu/~biology/fish/pubs/pdf/2009SPIE%20Biomimetics.pdf>

Fore, Joe; Wiechers, Ilse y Cook-Deegan, Robert (2006): The effects of business practices, licensing, and intellectual property on development and dissemination of

the polymerase chain reaction: case study. *Journal of Biomedical Discovery and Collaboration*, pp. 1-7.

Foroushani, Mansour y Dolati, Samera (2009): LDS concept based on remote sensing petroleum pipeline seeps detection in deep in deep. 24th International Cartographic Conference, pp. 1-14. Greece: International Cartographic Association.

Fowler, D; Meinhardt, H y Prusinkiewicz, P (1992): Modeling seashells. *Proceedings of SIGGRAPH '92*, in *Computer Graphics*. New York: ACM SIG-GRAPH, pp. 379–387.

Fraissignes, Pauline y Guedin, Denis (2008): Patente No. 7445925 B2. Estados Unidos.

Freeman, Christopher (1992): *The economics of hope: Essays on technical change, economic growth and the environment*. London: Pinter Publishers.

Furman, E., Primmer, E., Hildén, M., Peltola, T., Rinne, J., Söderman, T., & van Apeldoorn, R. (2007). En R. E. Hester (Editor); R. M. Harrison (Editor). *Biodiversity Under Threat* (2007), RSC Publishing, pp. 193-213.

Gallaia Nicola, Salles Jean, Setteled, Josef y Vaissière Bernard (2009): “Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline”. *Ecological Economics*, No.68, pp.810–821.

Gallopín, Gilberto (1994): *Impoverishment and Sustainable Development. A Systems Approach*. International Institute for Sustainable Development; Winnipeg, Canada

Gándara, Guillermo; Correa, Adriana y Hernández, Carlos (2006): Valoración económica de los servicios ecológicos que prestan los murciélagos *Tadarida brasiliensis* como controladores de plagas en el norte de México. *Cátedra de Integración Económica y Desarrollo Social*. Working Paper No. 2006-5, pp.1-18.

Gasser, Daniel; Hort, Michael; Shepherd; Benjamin y Tran, Quisinh (1998): Patente No. 199702736. Australia.

Gelfand, David; Stoffel, Susanne; Lawyer, Frances y Saiki, Randall (1989): Patente No. 4889818. Estados Unidos.

Gelfand, David; Lawyer, Frances y Stoffel, Susanne (1998): Patente No. 5789224 A. Estados Unidos.

General Accounting Office GAO of United State (2003): “Technology transfer: NIH-Private Sector Partnership in the Development of Taxol”. Report to the Honorable Ron Wyden, U.S. Senate, Washington DC.

Georgescu-Roegen, Nicholas (1978): Los Modelos Dinámicos Y El Crecimiento Económico. En Dagum, Camilo. Metodología y crítica económica. Lecturas Del Trimestre Económico. Fondo De Cultura Económica, México. No. 26, pp. 284-319.

Gérardin, L (1972): Naturals Vorbild: Die Entdeckung der Bionik. Bücher des Wissens. Frankfurt: Fischer Taschenbuch.

Gibbs, Diana y Muirhead, Ian. (1998): The Economic Value and Environmental Impact Of The Australian Beekeeping Industry. Maroubra: A report prepared for the Australian beekeeping industry.

Gleiche, Michael; Hoffschulz, Holger y Lenhert, Steve (2006): Nanotechnology in Consumer Products. Nanoforum Report. European Nanotechnology Gateway, pp. 1-30.

Glidden, Joseph (1874): Patente nº 157124 A. Estados Unidos.

Gould, Stephen (1985): El Pulgar del panda: ensayos sobre evolución. Barcelona: Ediciones Orbis S.A.

Goodwin, Richard (1990): Chaotic Economic Dynamics. Oxford: Oxford University Press.

Gordon Jenny y Davis Lee (2003): Valuing honeybee pollination. A report for the Rural Industries Research and Development Corporation, pp.1-42.

Greco, R; Prinz, F y Smith R (2005): *Nanoscale Technology in Biological Systems*. CRC Press.

Greenberger, Lee; Hari, Malathi; Nunes, Maria; Ayrat-Kaloustian, Semiramis; Zask, Arie y Wooters, Joseph (2007): Patente No. 20070026478 A1.

Grover, Sami (2013): The Lily Impeller: Nature-based design inspires game-changing efficiencies. Mother Nature Network.
<http://www.mnn.com/leaderboard/stories/the-lily-impeller-nature-based-design-inspires-game-changing-efficiencies>

Grubb Peter (1992): "A positive distrust in simplicity-lessons from plant defenses and from competition among plant and among animals" Journal of Ecology, No.80, pp.585-610.

Gruber, Petra; Bruckner, Dietmar; Hellmich, Christian; Schmiedmayer, Heinz-Bodo; Stachelberger, Herbert y Gebeshuber Ille (2011): Biomimetics -- Materials, Structures and Processes: Examples, Ideas and Case Studies. Berlin: Springer Science & Business Media

Gu, Trent; Huang, Fen y Hartnett, James (2003): Patente No. 6632645 B1. Estados Unidos.

Gu, Trent; Huang, Fen y Hartnett, James (2007): Patente No. 7214522 B2. Estados Unidos.

Gunasekera, Sarath y Longley, Ross (2000): Patente No. 6127406 A. Estados Unidos
Gunasekera, Sarath; Longley, Ross; Isbrucker, Richard; Paul, Gopal; Pomponi, Shirley y Wright, Amy (2002): Patente No. 6495594 B2. Estados Unidos.

Gunde-Cimerman, N; Friedrich, J; Cimerman, A y Benicki, N (1993): Screening fungi for the production of an inhibitor of HMG-CoA reductase: Production of mevinolin by the fungi of the genus *Pleurotus*. FEMS Microbiology Letters. Vol. 111, No. 3, pp. 203-206.

Hamilton, T. (2011): *Mad Like Tesla: Underdog Inventors and Their Relentless Pursuit of Clean Energy*. Toronto: ECW Press.

Hamilton, Kirk y Clemens, Michael (1998): Genuine Savings Rates in Developing Countries. World Bank. Economic Review. Vol. 13, No.2, pp. 1-27.

Hamilton, Kirk; Atkinson, Giles y Pearce, David (1997): Genuine Savings as an Indicator of Sustainability. Environment Department World Bank. CSERGE Working Paper GEC 97-03, pp. 1-28.

Hanks, Timothy y Swiegers Gerhard. (2012): The Concept of Biomimicry and Bioinspiration in Chemistry. En G. Swiegers, Bioinspiration and biomimicry in Chemistry Reverse-Engineering Nature, pp. 1-14. Hoboken: Wiley & Sons.

Harman, Jay (2013): *The Shark's Paintbrush: Biomimicry and How Nature is Inspiring Innovation*. Boston: Nicholas Brealey Publishing.

Hartwick, J y Long, N (1995): Constant consumption and the economic depreciation of natural capital: The non-autonomous case. Montreal: mimeo, Queen's University and McGill University.

Hastad, Olle y Odeen, Anders (2014): "A vision physiological estimation of ultraviolet window marking visibility to birds". PeerJ, pp. 1-15.

Hanusch, Horst (1988): *Evolutionary Economics: Applications of Schumpeter's Ideas*. Cambridge: Cambridge University Press.

Henriquez, Rubén; Jimeno, José y Mangués; Ramón (2003): Patente No. 2003033013 A1. World Intellectual Property Organization Wipo.

Herberstein, M y Fleitsch A (2003): Effect of abiotic factors on the foraging strategy of the orb-web spider *Argiope keyserlingi* (Araneae: Araneidae). *Austral Ecology*, Vol. 28, Tema 6, pp. 622–628.

Hicks, John (1946): *Value and Capital*. 2da Edición. Oxford: Clarendon Press.

Hodgson, Geoffrey (1995): *Economía Y Evolución: Revitalizando La Economía*. Colegio De Economistas De Madrid. Madrid: Celeste Ediciones.

Hoffman, William; Smith, Robert y Willard, Alvin (1984): Patente No. 4444784 A. Estados Unidos.

Hollenhorst, John (2008): U invention could have big impact in world sewage. <http://www.ksl.com/?nid=148&sid=4974856&autostart=y>

Honkavaara J, Koivula M, Korpimaki E, Siitari H y Viitala J (2002): Ultraviolet vision and foraging in terrestrial vertebrates. *Oikos*, 98, 505–511.

Hood, Christopher (2006): *Shinkansen: From bullet train to symbol of modern Japan*. London: Routledge Taylor & Francis Group.

Hornbeck, Richard (2010): “Barbed Wire: Property Rights and Agricultural Development”, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol.125, pp. 767-810.

Hort, Michael; Gasser, Daniel y Levey, John (2012): Patente n° 8235660 B2. Estados Unidos.

Hosey Lance (2012): *The Shape of Green: Aesthetics, Ecology, and Design*. Washington: Island Press.

Hueting, Roefie y Reijnders, Lucas (1998): Commentary Sustainability Is An Objective Concept. *Ecological Economics*. Vol. 27, pp. 139–147.

Hummels, H (2012): *Stairway to successful innovation*. New York: Maastricht University.

IMS Health MIDAS, (2013): Top 20 Global Products 2012. http://www.imshealth.com/deployedfiles/ims/Global/Content/Corporate/Press%20Room/Top-Line%20Market%20Data%20&%20Trends/Top_20_Global_Products_2012_2.pdf

Inouye, Satoshi; Kurose, Kouichi y Sakaki, Yoshiyuki (1992): Patente No. 5093240 A. Estados Unidos

Ishino, Yoshizumi; Kato, Ikunoshin y Uemori, Takashi (1998): Patente No. 0870832 A1. Europa.

Iwu, Maurice (1991): Patente No. 5019580 A. Estados Unidos.

Jacobs, Robert y Kerr, Russell (2006): Patente No. 7060686 B2. Estados Unidos.

Jacobs, Robert y Kerr, Russell (2002): Patente No. 20020091093 A1. Estados Unidos.

Jacobs, Robert y Faulkner, John (1984): Patente No. 4447445 A. Estados Unidos.

Jahromi, Mohammad; Liang, Juan; Ho, YinWan; Mohamad, Rosfarizan; Goh, YongMeng y Shokryazdan, Parisa (2012): Lovastatin Production by *Aspergillus terreus* Using Agro-Biomass as Substrate in Solid State Fermentation. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, pp. 1-11.

Japan for Sustainability (2005): JFS Biomimicry Interview Series: No.6 "Shinkansen Technology Learned from an Owl?" - The story of Eiji Nakatsu. Technologies Learned from Living Things: Concepts and Examples - Front Line Reports. Newsletter No.31. http://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id027795.html

Jensen, Peter (2012): Patente n° 8123948. Estados Unidos.

Johansson, L., Ovesen, M., & Hallberg, C. (2002): Self-organizing Flow Technology in Viktor Schauburger's Footsteps . Malmö: Institute of Ecological Technology Scientific and Technical Reports .

Johnson, Kraig (2010): Poo-Gloos An Eco-Friendly Solution for Wastewater Lagoons. En Wyoming Wastewater Lagoon Design and operation Seminar. Department of Enviromental Quality. Water & Wastewater program. Febrero, Utah <http://deq.state.wy.us/wqd/www/Program%20Resources/1.%20Program%20ex%20OCAFO%20OpCert%20Source%20Water/Seminars%20and%20Presentations/Seminars/PooGloos.pdf>

Johnson, Kraig; Reaveley, Lawrence; Jaeger, Fred; Xu, Hua y Okey, Robert (2014): Patente n° 8764986 B2. Estados Unidos.

Johnson, Nick (2012): "Health care (Pharmaceuticals)". Report to Henry Fund Research. Tippie School of Management, The University of Iowa.

Johnson, Steven (2002): *Emergence: The Connected Lives of Ants, Brains, Cities, and Software*. New York: Simon and Schuster.

Justice, Alan; Singh, Tejinder; Gohil, Kishor y Valentino, Karen (1994): Patente No. 5364842 A. Estados Unidos.

Kathawala, Faizulla (1988): Patente No. 4739073 A. Estados Unidos.

Kelly, Michael (1868): Patente n° 503268 A. Estados Unidos.

Kenneth, Ian (2003): Patente No. 1137921 B1. Europa.

Kerstiens, Gerhard (1996): Cuticular water permeability and its physiological significance. *The Journal of Experimental Botanic*, No. 47, pp.1813–1832.

Kerr, Russell (2000): Patente No. 6046041 A. Estados Unidos.

Klem D (2009): Avian mortality at windows: the second largest human source of bird mortality on earth. In: Rich TD, Arizmendi C, Demarest D, Thompson C, eds. *Tundra to tropics: connecting birds, habitats and people*, Proceedings of the fourth international partners in flight conference 2008 partners in flight, McAllen, Texas, USA. 244–254

Kim, Sun-Joong y Lee, Ji-Hyun (2012): “How Biomimetic Approach Enlarges Morphological Solution Space in A Streamlined High-speed Train Design”. *SIGRAD*. pp. 538-542

Kinder, Frederick Ray (2003): Patente No. 6506910 B1. Estados Unidos.

Koskan, Larry; Low, Kim; Meah, Abdul y Atencio Anne (1993): Patente No. 5221733. Estados Unidos.

Kraismer, L (1967): *Bionik: Eine neue Wissenschaft. Kleine naturwissenschaftliche Bibliothek, Reihe Physik, Vol. 4.* Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft,.

Krishnamoorthy, Ramesh; Trevino, Leo y Evans, Richard (2007): Patente No. 20070225343 A1. Estados Unidos.

Kulyk, R. (2009): *Smart Grid – Taking Our Cue From Nature*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

Kulyk, R y Kerbel M (2009): Patente 7580775 B2. Estados Unidos.

Kyle, David (1994): Patente No. 5374657 A. Estados Unidos.

Lahaye, Natalie y Llerena, Daniel (1996): Technology and sustainability: an organisational and institutional change. En Faucheux, S; Pearce, D y Proops, J (1996). *Models of Sustainable Development*. Cheltenham: Edward Elgar, pp. 205 – 228.

Lacerda, Clécio de; Vila, Nívea y Fanguero, Raúl (2011): Estudio de métodos de aproximación y el uso de analogías con el desarrollo de textiles biomiméticos.

http://repositorium.sdum.uminho.pt/xmlui/bitstream/handle/1822/15717/5_2011%20Estudio%20de%20m%C3%A9todos%20de%20aproximaci%C3%B3n%20y%20el%20uso%20de%20analog%C3%ADas%20con%20el%20desarrollo%20de%20textiles%20biomim%C3%A9ticos..pdf?sequence=1

Landis, Douglas; Gardinera, Mary; van der Werf, Wopke y Swinton, Scott (2008): Increasing corn for biofuel production reduces biocontrol services in agricultural landscapes. PNAS, Vol. 105, No. 51, 52-57. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0804951106

Langinier, Corinne y Moschini, GianCarlo (2002): Economics of Patents: An Overview. The Staff General Research Papers No. 2061, Department of Economics, Iowa State University.

Leadbeater, Ellouise y Chittka, Lars (2007): Social Learning in Insects — From Miniature Brains to Consensus Building. Current Biology. Vol. 17, Tema 16, No.21, pp. 703–713

Leakey, Richard y Lewin, Richard (1998): La Sexta Extinción: El Futuro De La Vida Y De La Humanidad. Barcelona: Tusquets Editores, S.A.

Lehmann, Fritz (2008): When wings touch wakes: understanding locomotor force control by wake wing interference in insect wings. The Journal of Experimental Biology, No. 211, pp. 224 –233.

Lentink D, Dickson W, Leeuwen J, Dickinson M (2009): Leading-Edge Vortices Elevate Lift of Autorotating Plant Seeds. Science, Vol. 324, No. 5933, pp. 1438-1440.

Lepora Nathan; Verschure Paul y Prescott Tony. (2013): “The state of the art in biomimetics”. Bioinspiration & Biomimetics, No.8, pp.1-11.

Leydecker, Sylvia (2008): Nano Materials in Architecture, Interior Architecture and Design. Basel: Springer.

Lewandrowski, J; Darwin, R; Tsigas, M y Raneses, A (1999): Estimating Costs Of Protecting Global Ecosystem Diversity. Ecological Economics, Vol. 29, No.1, pp. 111-125.

Lewin, Roger (1994): Evolución humana. Barcelona: Salvat Editores.

Li, Chaorong Ji, Ailing y Caoa, Zexian (2007): Stressed Fibonacci spiral patterns of definite chirality. Applied physics letters. Vol. 90, pp 1-3.

Liua, Kesong y Jiang, Lei (2011): Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. Nano Today, Vol. 6, Tema 2, pp. 155–175.

Libes Susan (2009): Organic Products from the Sea: Pharmaceuticals, Nutraceuticals, Food Additives, and Cosmoceuticals. En Libes, Susan. Introduction to Marine Biogeochemistry. San Diego: Academic Press.

Litinetski, I (1975): Iniciación a la biónica. Barcelona: Barral Editores.

López, Ignacio (2014): Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético. Ingeniería de Diseño y Fabricación. Universidad de Zaragoza.

Losey John y Vaughan Mace (2006): The Economic Value of Ecological Services Provided by Insects BioScience, No.56, Vol.4, pp.311-323.

Lucia, Ellis (1975): A lesson from nature: joe cox and his revolutionary saw chain. Journal of forest history, pp. 159-165

Lundvall, Bengt-Åke (1988): Innovation as an interactive process: from user-producer interaction to the national system of innovation. En Dosi et al. (1988). Technical Change and Economic Theory. London: Pinter, pp. 349-369.

Lundvall, Bengt-Åke (1996): The social dimension of the learning economy. Druid Working Paper No. 96-1, pp. 1-24.

Lundvall, Bengt-Åke (2004): The economics of Knowledge and learning en Jesper L. Christensen and Bengt-Ake Lundvall Product Innovation, Interactive Learning and Economic Performance (Research on Technological Innovation, Management and Policy, Vol. 8, Emerald Group Publishing Limited, pp.21-42

Madigan, Michael; Martinko, John; Parker, Jack; Brock, Thomas; Rodríguez, Carmina y Sánchez, Miguel (2004): Brock Biología de los microorganismos. Madrid: Pearson Prentice Hall.

Maglic, Michael (2014): Biomimicry: Using Nature as a Model for Design. Masters Theses 1896, Paper 871, pp.1-88.

Mäler, Karl (1991): National accounts and environmental resources. En Costanza et al. (1997), pp. 440-454.

Magnusson, Lars (1994): Evolutionary and Neo-Schumpeterian Approaches to Economics. Boston, Kluwer.

Malik, Sonia; Cusidó, Rosa; Hossein, Mohammad; Moyanod, Elisabeth; Palazón, Javier y Bonfill, Mercedes (2011): Production of the anticancer drug taxol in *Taxus baccata* suspension cultures: A review. Process Biochemistry, Vol. 46, pp. 23–34.

Manjón, F, Villalba, J, Arribas, E y Nájera, A (2013): Vórtices no estacionarios en un vaso de agua. Revista Brasileira de Ensino de Física, Vol.35, No.3, pp. 1-11.

Mármol, Zulay; Páez, Gisela; Rincón, Marisela; Araujo Karelen; Aiello, Cateryna; Chandler Cintia y Gutiérrez, Edixon (2011): Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. Revista Tecnocientífica, pp.53-58.

Martin, Raúl (2011): Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication. San Diego: Spie Press.

Martinez-Alier, J y Schlüpmann, K (1991). La ecología y la economía (No. GTZ-696). Madrid: Fondo de Cultura Económica.

Mauro, Francesco y Hardison, Preston (2000): Traditional Knowledge of Indigenous and Local Communities: International Debate and Policy Initiatives. Ecological Applications, Vol. 10, No. 5, pp. 1263-1269.

Mathur, Eric (2006): Patente No. 7045328 B2. Estados Unidos.

Mathur, Eric; Marsh, Edward y Schoettlin, Warren (2001): Patente No. 6280998 B1. Estados Unidos.

Matthews, Emily; Amann, Christof; Bringezu, Stefan; Fischer-Kowalski, Marina; Hüttler, Walter; Kleijn, René; Moriguchi, Yuichi; Ottke, Christian; Rodenburg, Eric; Rogich, Don; Schandl, Heinz; Schütz, Helmut; Van der Voet, Ester y Weisz, Helga (2000): The Weight of Nations: Material Outflows From Industrial Economies. Washington: World Resources Institute.

Mayer, Alejandro; Glaser, Keith; Cuevas, Carmen; Jacobs, Robert; Kem, William; Little, Daniel; McIntosh, Michael; Newman, David; Potts, Barbara y Shuster, Dale (2010): Reviews The odyssey of marine pharmaceuticals: a current pipeline perspective. Trends in Pharmacological Sciences, Vol.31, pp.255–265
McKeag, Tom (2013): Case Study: Making Paste. Zygote Quarterly fall 2013.
<http://www.blueplanet-ltd.com/userfiles/file/Zygote-Article-6-2014-ZQ07.pdf>

Mazzoleni, R y Nelson, R (1998): The Benefits and Costs of Strong Patent Protection: A Contribution to the Current Debate. Research Policy No. 27, pp. 273-84.

McKinstry, Robert; Ripp, Coreen y Lisy, Emily (2006): Biodiversity Conservation Handbook: State, Local, and Private Protection of Biological Diversity. En McKinstry, R; Ripp, C y Lisy, E (2006). Environmental Law Institute, pp. 651.

Mcneely, J (1988): Economics and Biological Diversity: Developing and Using Economic Incentives To Conserve Biological Resources, Iucn; Washington Dc

Menéndez, José (2005): Nuevos antitumorales de origen marino. Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia. Vol. 71, pp. 341-363.

Meadows, D; Meadows, D y Randers, J (1992). Beyond The Limits. Chelsea: Green Pub. Co.

Meyer, Anne (2002): Self-Cleaning Surfaces: Biolubricants, drag reduction. En Committee on Marine Biotechnology: Biomedical Applications of Marine Natural Products, Division on Earth and Life Studies, Board on Life Sciences, Ocean Studies

Board, National Research Council. Marine Biotechnology in the Twenty-First Century: Problems, Promise, and Products. Washington: National Academies Press.

Miklosovic, D; Murray M, Howle, L y Fish F (2004): "Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers". *Physics of Fluids*. Vol 16, No. 5, pp. 39-42. <http://darwin.wcupa.edu/~biology/fish/pubs/pdf/2004PF-Megaptera.pdf>

Miller, Loren (1986): Patente No. PP5751 P. Estados Unidos.

Mokyr, Joel (1990): The lever of Riches: technological creativity and economic progress. New York: Oxford University Press.

Mokyr, Joel (1993): La Palanca De La Riqueza, Creatividad Tecnológica Y Progreso Económico. Madrid: Alianza Editorial S.A.

Mokyr, Joel (2003): Long-Term Economic Growth and the History of Technology. Version of June 2003, Prepared For The Handbook Of Economic Growth. Edited By Philippe Aghion y Steven Durlauf.

Molinero; Laura, Marchante, Maria Del Car, Rodriguez, Rogelio; Solloso, Andres; Lopez María de Jesús y Benitez, José (2007): Patente No. 2007068776 A1. World Intellectual Property Organization Wipo.

Monaghan, Richard; Alberts, Alfred; Hoffman, Carl y Albers-Schonberg, George (1980): Patente No. 4231938 A. Estados Unidos.

Moreno, Liz (2009): Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión Agronomía Colombiana, Vol. 27, No. 2. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/view/11131/37762>

Morse, Roger y Calderone, Nicholas (2000): "The Value of Honey Bees As Pollinators of U.S. Crops in 2000". Bee Culture, No.128, pp.1–15.

Muijres FT, Johansson LC, Bowlin MS, Winter Y, Hedenström A (2012) Comparing Aerodynamic Efficiency in Birds and Bats Suggests Better Flight Performance in Birds. PLoS ONE Vol. 7, Tema.5, pp. 1-9.

Mueller, Reinhold; Piehl, Richard; Skowron, Piotr y Swaminathan; Neela (1996): Patente No. 1996014405 A3. World Intellectual Property Organization Wipo.

Muller-Cohn, Judy y Muller, Rolf (2009): Patente n° 20090298132 A1. Estados Unidos.

Mullis, Kary (1990): The Unusual Origin of the Polymerase Chain Reaction. Scientific American, pp 56-65.

Mullis, K; Faloona, F; Scharf, J; Saiki, R; Horn, G y Ehrlich, H (1986): Specific enzymatic amplification of DNA in vitro: the polymerase chain reaction. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology. Vol. 51, pp. 263-273.

Muramatsu, Toyojiro; Mashita, Katsumi; Shinoda, Yasuo; Sassa, Hironori; Kawashima, Hiroyuki; Tanizawa, Yoshio y Takeuchi, Hideatsu (2002): Patente No. 6465477 B1. Estados Unidos.

Murray M; Miklosovic D; Fish F y Howle L (2005): Effects of leading edge tubercles on a representative whale flipper model at various sweep angles. In: Conference Proceedings of the 14th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. August, Durham-New Hampshire.

Myers, Norman y Kent, Jennifer (1998): Perverse Subsidies: Tax \$\$ Undercutting Our Economies and Environments Alike. En The International Institute for Sustainable Development, Canada.

National Academy of Engineering (2007): Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2006 Symposium. Washington: The National Academies Press.

National Research Council NCR (1999): Perspectives on Biodiversity: Valuing Its Role in an Everchanging World. Committee on Noneconomic and Economic Value of Biodiversity. Washington: National Academies Press.

Naylor, Rosamod y Ehrlich, Paul (1997): Natural pest control services and agriculture. En Daily, Gretchen. Nature's Services: Societal Dependence On Natural Ecosystems. Washington: Island Press, pp. 151-174.

Nelson, Richard (1959): The Simple Economics of Basic Scientific Research. Journal of Political Economy. Vol. 67, No.3, pp. 297-306.

Niddam-Hildesheim, Valerie y Sterimbaum, Greta (2008): Patente No. 7396927 B2. Estados Unidos.

Nuppenau Ernst-August (2002): Towards a Genuine Exchange Value of Nature: Interactions between Humans and Nature in a Principal – Agent Framework. Ecological Economics. Vol. 43, pp. 33 – 47.

Newman, David y Cragg, Gordon (2014): Marine-Sourced Anti-Cancer and Cancer Pain Control Agents in Clinical and Late Preclinical Development. Marine drugs. Vol.12, pp. 255-278.

Niklas, Karl (1992): Plant Biomechanics: An Engineering Approach to Plant Form and Function. Chicago: University Of Chicago Press.

Nonomura, Yoshiaki; Sasaki, Hiroyuki; Karaki, Hideaki y Fusetani, Nobuhiro (1998): Patente No. 5760065 A. Estados Unidos.

Nordhaus, W (1969): *Inventions, Growth and Welfare: A Theoretical Treatment of Technological Change*. Cambridge, MA: MIT Press.

Norgaard, Richard (1984): *Coevolutionary Development Potential*. Land Economics. Vol. 60, No. 2, pp. 160-173.

Nordhaus, William (1995): *How Should We Measure Sustainable Income?* Cowles Foundation for research in economics at Yale University. Discussion Paper 1101.

Nordhaus, William y Tobin, James (1972): *Is growth obsolete?* En: *Economic Growth*, National Bureau of Economic Research, General Series No. 96, New York, pp.1–80.

Nosonovsky, Michael y Bormashenko, Edward (2009): *Lotus Effect: Superhydrophobicity and Self-Cleaning*. Functional Properties of Bio-Inspired Surfaces, pp. 43-78.

Nosonovsky, Michael y Rohatgi, Pradeep (2011): *Biomimetics in Materials Science: Self-Healing, Self-Lubricating, and Self-Cleaning Materials*. New York: Springer Science & Business Media.

Obst, Yuri (2002): Patente n° 6354442 B1. Estados Unidos.

Obst, Yuri (2007): “The impact of micro-screening upon higher-order water treatment processes”. *Waste Treatment. Chemical Technology*, pp. 9-11.

Oeffner, Johannes y Lauder, George (2012): *The hydrodynamic function of shark skin and two biomimetic applications*. The Journal of Experimental Biology. Vol. 215, pp. 785-795.

Organisation for Economic Co-operation and Development (1999): *Handbook of Incentive Measures for Biodiversity Design and Implementation: Design and Implementation*. Paris: OECD Publishing, pp. 176.

Organisation for Economic Co-operation and Development (2013): *Contributing to the bioeconomy: The economic Potential of Marine Biotechnology*. En: *Marine Biotechnology: Enabling Solutions for Ocean Productivity and Sustainability*. Contributing to the bioeconomy: The economic potential of marine biotechnology. Paris: OECD Publishing.

Osman, Dean (2013): Patente n° 2160336 B1. Europa.

Ovesen, M, y Hallberg, C (2011): Patente nº 0083751A1. Estados Unidos.

Pacheco F, Labrincha, J, Diamanti M, Yu C y Lee H (2014): *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. Springer.

Panayotou, Theodore (1994): Conservation of biodiversity and economic development: The concept of transferable development rights. En *Environmental and Resource Economics*. Vol. 4, Tema. 1, pp. 91-110.

Palmer, Andrew y King, Roger (2008): *Subsea Pipeline Engineering*. Tulsa-Oklahoma: PennWell Books.

Pandolfi, Camilla y Izzo, Dario (2013): Biomimetics on seed dispersal: survey and insights for space exploration. *Bioinspiration & Biomimetics*, No.8, pp. 1-9.

Patil, Damodar; Fan, Laiduien; Fan, Joseph y Yu, Jiangping (2011): Patente n° 7999040 B2. Estados Unidos.

Park, Douglas (1993): Patente No. 5206141 A. Estados Unidos.

Park, Joon y Yoon, Kwang-Joon (2008): "Designing a biomimetic Ornithopter capable of sustained and controlled flight". *Journal of Bionic Engineering*, pp. 39-47.

Pearce, David (2007): Do we really care about Biodiversity? *Environmental Resource Economics*. Vol. 37, pp. 313-333.

Pearce, David y Moran, Dominic (1994): *The Economic Value Of Biodiversity*. London: Earthscan Publications Ltd in Association With The Biodiversity Programme Of Iucn-The World Conservation Union.

Pearce, Graeme (2012): "Biomimetic Membranes: Taking on Energy Usage in Water Purification". *WaterWorld*. Vol 26.

<http://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-27/issue-3/editorial-focus/desalination/biomimetic-membranes-taking.html>

Pearce Mick (15 de Octubre de 2013): The Eastgate Centre in Harare – a termite mound in disguise. (David Parr, Entrevistador).

Pearce, D y Atkinson, G (1993): Capital Theory and Measurement of Sustainable Development, an Indicator of "Weak" Sustainability. *Ecological Economics*. No. 8, pp. 103- 108.

Pettit, George y Singh, Sheo (1990): Patente No. 4978744 A. Estados Unidos.

Pezzey, John (1989): *Economic Analysis of Sustainable Growth and Sustainable Development*. Working Paper No. 15. The World Bank Environment Department. The World Bank Policy Planning And Research Staff – Environment Department.

Perrings, Charles (1986): Conservation of mass and instability in a dynamic economy–environment system. *Journal of Environmental Economics and Management*, No. 13, pp. 199-211.

Perrings, Charles; Mäler, Karl; Folke, Karl; Holling, CS y Bengt-Owe, Jansson (1995a): *Biodiversity Loss: Economic and Ecological Issues*. Cambridge: Cambridge University Press.

Perrings, Charles; Holling, C.S; Mäler, Kalr; Bengt-Owe, Jansson y Folke, Karl (1995b): *Biodiversity Conservation: Problems and Policies*. Dordrecht: Kluwer Academic Press.

Pimentel, David; Wilson, Christa; McCullum, Christine; Huang, Rachel; Dwen, Paulette; Flack, Jessica; Tran, Quynh; Saltman, Tamara y Cliff, Barbara (1997): Economic and Environmental Benefits of Biodiversity. *BioScience*, No.47, Vol.11, pp. 747-757.

Pitchford, John (1998): Variable Returns to Scale, Resources and Population. En *Increasing Returns and Economic Analysis* Edited by Kenneth Arrow, Yew-Kwang Ng y Xiaokai Yang. Basingstoke: Macmillan Published, pp. 432-444.

Pomponi, Shirley (1999): The potential for the marine biotechnology industry. *Industry-Driven Changes and Policy Responses*, pp. 101-104.

Posey, D y Dutfield, G (1996). *Beyond intellectual property: toward traditional resource rights for indigenous peoples and local communities*. Ottawa: International Development Research Centre IDRC.

Prakash Soumya, Choudary K, Kar M, Das Lopamudra y Avijeet Jain (2009): Plants in traditional medicinal system - future source of new drugs. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, Vol. 1, Tema 1, pp. 1-23.

Pugno, Nicola (2007): Velcro® nonlinear mechanics. *Applied Physics Letters* No.90, pp. 1-3.

Purkayastha, D y Maseeha, S (2009): Speedo: Leading the swimwear market. *Case Studies*. IBS Center for Management Research, pp. 1-21.

Puu, Tönu (2003). *Attractors, Bifurcations, and Chaos: Nonlinear Phenomena in Economics*, Springer Science & Business Media, 2003.

Querellou, Joel y Cambon, Marie Anne (2004): Patente No. 6673585 B1. Estados Unidos.

Ragaei, Mohamed y Sabry Al-Kazafy (2013): Insect wings as a solar cell system. *International Journal of Open Scientific Research*. Vol.1, No. 3, pp.10-26

Rajchard, J (2009): "Ultraviolet (UV) light perception by birds: a review". *Veterinarni Medicina*, No. 54, Vol.8, pp. 351–359

Rankouhi, Azadeh (2012): "Naturally inspired design investigation into the application of biomimicry in architectural design". The Pennsylvania State University. The Graduate School Department of Architecture.

Rausser, Manfred; Thierauf, Axel; Kammermaier, Josef y Liu Yinyuan (2005): Patente n° 1566502 B1. Europa.

Rawlings, Andrea; Bramble, Jonathan y Staniland Sarah (2012): "Innovation through imitation: biomimetic, bioinspired and biokleptic research". *Soft Matter*, Tema 25, No. 8, pp. 6675–6679.

Rebouillat, Serge y Lapray, Mirosława (2014): Bio-inspired and Bio-inspiration: a Disruptive Innovation Opportunity or a Matter of "Semantic"? A Review of a "stronger than logic" Creative Path based on Curiosity and Confidence. *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028 9324 Vol. 6 No.3, pp. 299-325.

Reed, Emily; Klumb, Lisa; Koobatian, Maxwell; y Viney, Christopher. (2009): Biomimicry as a route to new materials: what kinds of lessons are useful? *Philosophical Transaction of the Royal Society*, No.367, pp.1571–1585.

Repetto, Robert (1991): *La Erosión en el Balance General: Cómo Contabilizar la Pérdida de Recursos Naturales*. Santiago de Chile: Ed. Joaquín Vial, pp. 89-124.

Richards, Ken (1993): "Non-apis bees as crop pollinators". *Revue Suisse de Zoologie*, No.100, pp.807-822.

Ribordy, P. (2011): Efficiency of Watreco's vortex generator in wastewater. *Stockholms: Stockholms Universitet*.

Rinehart, Kenneth y Holt, Tom (1992): Patente n° 5089273 A. Estados Unidos.

Rinehart, Kenneth; Morales, Jose; Reid, Joel; Reymundo, Isabel; Floriano, Pablo y García, Lola (2006): Patente No. 7115743 B2. Estados Unidos.

Robinson, Willard; Nowogrodzki, Richard y Morse, Roger (1989): "The value of honey bees as pollinators of US crops: part I". *American Bee Journal*, pp. 477-487.

Roccia, Bruno; Preidikman, Sergio; Estrada, Carlos y Massa, Julio (2013): Estudio del "vuelo" de semillas autorrotantes. *Mecánica Computacional*, Vol. XXXII, pp. 1481-1500.

Roche (2013): Roche Diagnostics. Business Overview 2013. <http://www.roche.com/diagnosticsbrochure.pdf>

Rodríguez, Ignacio; Polanco, Concepción; Cuevas, Félix; Mandez, Paloma; Cuevas, Carmen; Gallego, Pilar; Munt, Simon y Manzanares, Ignacio (2002): Patente No. 2002002596 A3. World Intellectual Property Organization Wipo.

Ronald, Pamela; Wang, Guo-Liang y Song, Wen-Yuang (1999): Patente No. 5859339 A. Estados Unidos.

Rosenberg, N (1979): Problemas del economista en la conceptualización de la innovación tecnológica. En Rosenberg, N. Tecnología y Economía. Barcelona: G. Gili SA, pp. 73-97.

Ross, Robert; Low, Kim; Koskan, Larry y Wheeler, Alfred (1997): Patente nº 5612384. Estados Unidos.

Rosser, J. B. (2000). From Catastrophe to Chaos: A General Theory of Economic Discontinuities: Mathematics, Microeconomics and Finance (Vol. 1). Springer.

Rosser Jr, J. B. (2007). The rise and fall of catastrophe theory applications in economics: Was the baby thrown out with the bathwater?. Journal of Economic Dynamics and Control, 31(10), 3255-3280.

Roth, Manuela y Uphaus, Nicolas (2008): Ecological Design. New York: teNeues Verlag GmbH + Co KG.

Roth, Bruce (1987): Patente No. 4681893 A. Estados Unidos.

Rouni, G y Kim, M (2006): Modern construction materials and environment quality of buildings, In: International Workshop on Energy Performance and Environmental Quality of Buildings, Milos island, Greece.

Ryan N, Evans K, Alexander P, Chirnside I, McEwan I, Stebbing T (2007): Using Platelet Technology to seal and locate leaks in subsea umbilical lines in Offshore Technology Conference abril-mayo, Houston Texas.

Sachs associates (2011): 11th Annual Biotech In Europe Investor Forum September, Zurich-Switzerland www.sachsforum.com

Sand, P.H. (2001) A Century of Green Lessons: The Contribution of Nature Conservation Regimes to Global Governance. International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, Vol 1, No. (1), pp. 33-72.

Sanns, W. Catastrophe Theory with Mathematica: A Geometric Approach. Germany: Der Andere Verlag, 2000.

Sarreal, Eugenio; Mann, John; Stroikey, James y Andrews, Robin (1997): Patente No. 5663484 A. Estados Unidos.

Schmitt, Otto (1969): Some interesting and useful biomimetic transforms. Proceedings of Third International Biophysics Congress, pp. 297. Boston.

Schumpeter, J (1971): Capitalismo, socialismo y democracia. Madrid: Aguilar.

Schwartzmann, Gilberto; Brondani, Adriana; Berlinck, Roberto y Jimeno, Jose (2001): Marine organisms as a source of new anticancer agents, Marine-derived anticancer agents. THE LANCET Oncology, Vol. 2, pp. 221-225.

Segura, Olman (1999): Systems of innovation and learning from natural capital. DRUID's Summer Conference on Innovation Systems, Industrial Dynamics and Innovation Policy, Rebuild: Department of Business Studies Aalborg University, pp 1-25.

Shimomura, Masatsugu (2010): The New Trends in Next Generation Biomimetics Material Technology: Learning from Biodiversity. Quarterly Review. No.37, pp. 53-75.

Short, Jay (2004): Patente No. 6713281 B2. Estados Unidos.

Simon, Julian (1996): The Ultimate Resource II: People, Materials, and Environment. Princeton: Princeton University Press.

Solow, R (1974): The Economics Of Resources Or The Resources Of Economics. American Economic Review. Vol. 64, No. 2, pp. 1-14.

Solow, Robert (1993). An Almost Practical Step Toward Sustainability. Resources for the Future. Washington: Island Press.

Somiari, Richard; Adebisi, Ebenezer; Ukachukwu Livinus; Mba Igbe; Anthony, Friday; Ogundele, Anthony; Onuaha, Innocent; Brainard, Marissa; Lubert, Susan; Larson, Caroline; Russell, Stephen; Bharathan, Narayanaswamy y Somiari, Stella (2011): STR Analysis of Human DNA Samples After Dry-State Ambient Temperature Storage in GenPlates. The Open Forensic Science Journal. Vol 4, pp. 30-35.

Southwick, Edward y Southwick, Lawrence (1992): "Estimating the economic value of honey bees as agricultural pollinators in the United States". Economic Entomology, No.85, pp.621-633.

Saunders, P (1980): Una Introducción A La Teoría De Las Catástrofes. Madrid: Siglo Veintiuno Editores.

Stagnitti, Marie (2008): Trends in Statins Utilization and Expenditures for the U.S. Civilian Noninstitutionalized Population, 2000 and 2005. Agency for Healthcare Research and Quality, Rockville, MD. Statistical brief No.205, pp.1-3. http://www.meps.ahrq.gov/mepsweb/data_files/publications/st205/stat205.pdf

Stewart, M; Ward, SJ y Drew, J (2014): Use of adenovirus as model system to illustrate a simple method using standard equipment and inexpensive excipients to remove live virus dependence on the cold-chain. *Vaccine*, No 32, pp.2931-2938.

Swanson, Timothy (1995): *Intellectual Property Rights And Biodiversity Conservation: An Interdisciplinary Analysis Of The Values Of Medicinal Plants*. Cambridge: Cambridge University Press.

Swanson, Timothy y Goschl, Timo (2000): Property rights issues involving plant genetic resources: implications of ownership for economic efficiency. *Ecological Economics*. Vol. 32, No.1, pp. 75-92.

Swiegers, Gerhard; Lehn, Jean-Marie y Benyus, Janine (2012): *Bioinspiration and Biomimicry in Chemistry: Reverse-Engineering Nature*. Hoboken-New Jersey: John Wiley and Sons.

Tang, Y; Zhao, Y; Wang, R; Helix Nielsen, C y Fane, A (2013): Desalination by biomimetic aquaporin membranes: Review of status and prospects. *Desalination*, Vol. 308, pp. 34-40.

Terahara, Akira y Minoru, Tanaka (1982): Patente No. 4346227 A. Estados Unidos.

The economics of ecosystems & biodiversity TEEB (2009): A report TEEB Climate Issues Update. <http://www.unep.ch/etb/ebulletin/pdf/TEEB-ClimateIssuesUpdate-Sep2009.pdf>

Thierauf, Axel (2006): Patente: n° 19746053 A1. Alemania.

Thierauf, Axel; Stoll, Alexander; Ackerhans, Carsten y Gast, Eduard (2010): Patente: n° 502005008940. Alemania.

Thom, René (1985): *Parábolas Y Catástrofes*. Madrid: Tusquets Editores S.A.

Tobin, B (1997): Know-how Licences: Recognising Indigenous Rights Over Collective Knowledge. *Bulletin of the Working Group on Traditional Resource Rights*. Winter.

Toledo Alejandro (1998). *Economía De La Biodiversidad*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente Oficina Regional para América Latina y el Caribe, Pnuma. Serie Textos Básicos Para La Formación Ambiental No. 2, pp.1-209.

Toman, M; Pezzey, J y Krautkraemer, J (1995): Neoclassical Economic Growth Theory and 'Sustainability'. En Bromley, D (1995). *Handbook of Environmental Economics*. Blackwell: Oxford.

Tomer, Onkar; Glomski, Peter y Borah, Kripanath (1999): Patente No. 5900240 A. Estados Unidos.

Tovee M.J. (1995): Ultra-violet photoreceptors in the animal kingdom – their distribution and function. *Trends in Ecology & Evolution*. No. 10, pp.455–460.

Thastrup, Ole; Kongsbak, Lars, Petersen, Sara (1999): Patente No. 5958713 A. Estados Unidos.

Triplitt, Curtis y Chiquette, Elaine (2006): “Exenatide: From the Gila Monster to the Pharmacy”. *J Am Pharm Assoc*, Vol. 46, pp.44-55.

Tremblay, Gilles; Kalbakji, Aida y Fillion, Mario (2009): Patente No. 2009127059 A1. World Intellectual Property Organization Wipo.

Tsuzuki, Takuya (2013): *Nanotechnology Commercialization*. Singapore: Pan Stanford Publishing.

Turner, Scott y Soar, Ruper (2008): *Beyond biomimicry: What termites can tell us about realizing the living building*. First International Conference on Industrialized, Intelligent Construction, pp. 1-18, Loughborough: Loughborough University.

Tushuizen Maarten, Bunck Mathijs, Pouwels Petra, Van Waesberghe Jan, Diamant Michaela y Heine Robert (2006): Incretin mimetics as a novel therapeutic option for hepatic steatosis. *Liver International*, Vol. 26, pp. 1015–1017.

Tzonis, Alexander; Lefaivre, Liane y Stagno, Bruno (2001): *Tropical Architecture: Critical Regionalism in the Age of Globalization*. New York: John Wiley and Sons.

Vagnell, M (2013): Effect of vortex-processed water on tomato (*Solanum lycopersicum*) plants. Alnarp: Swedish University of Agricultural Sciences.

Van Kesteren, Ch; De Vooght, M; López, L; Mathôt, R; Schellens, J; Jimeno, J y Beijnen, J (2003): Yondelis (trabectedin, ET-743): the development of an anticancer agent of marine origin. *Anticancer Drugs*. Vol.14, No.7, pp. 487-502.

Van Lenteren, Joop (2011): The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl: Journal of the International Organization for Biological Control*. Vol.1, Tema 1, pp. 1-21.

Van Den Bergh, Jeroen (1996). *Ecological Economics and Sustainable Development: Theory. Methods and Applications*. London: Edward Elgar.

Varian, Hal R. 1979. “Catastrophe Theory and the Business Cycle,” *Economic Inquiry* 17:1, pp. 14-28.

Varian, Hal (1992): *Análisis Microeconómico*. Barcelona: Anoni Bosch Editor.

Vattam, S; Helms, ME y Goel AK (2009): Nature of creative analogies in biologically inspired innovative design. En Conference: Proceedings of the 7th Conference on Creativity & Cognition, Berkeley, California, Estados Unidos, Octubre, pp. 255-264.

Veselovsky Z (2001): General Ornithology. Prague: Academia.

Vilches, A; Legarralde, T; Maroñas, M y Darrigran, G. (2012): Aportes para el trabajo en el aula. Un enfoque para determinar la forma de vida de los moluscos bivalvos a partir de la morfología de valvas. Revista de Educación en Biología, 15(2), 47-57.

Vincent, Julian; Bogatyreva, Olga; Bogatyrev, Nikolaj; Bowyer, Adrian; Pahl, Anja (2006): "Biomimetics: its practice and theory", Journal of the Royal Society Interface, pp. 471–482.

Vincent, Julian y Mann, Darrell (2002): Systematic technology transfer from biology to engineering. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, No. 360, pp. 159–173.

Vogel, Steven (2000): Ancas y palancas, mecánica natural y mecánica humana. Barcelona: Tusquets Editores.

Von Gleich, Arnim; Pade, Christian; Petschow, Ulrich y Pissarskoi, Eugen (2009): Potentials and Trends in Biomimetics. Berlin: Springer-Verlag.

Von Baeyer, Hans (2000): The Lotus Effect. The Sciences. Vol. 40, Tema 1, pp. 12–15.

Vorhies, Frank (1996): Making community conservation economically attractive. Community Conservation Discussion Paper. African Wildlife Foundation. No. 9, pp. 1-6.

Wackernagel, M., y Rees, W. (1998). *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth* (No. 9). New Society Publishers.

Wagner, U. J. (2001). The Design of Stable International Environmental Agreements: Economic Theory and Political Economy. Journal of Economic Surveys, Vol. 15, No. 3, pp. 377-411.

Wani Mansukhlal, Lawrence Harold, Wall Monroe, Coggon Philip, McPhail Andrew (1971): "Plant antitumor agents. VI. Isolation and structure of taxol, a novel antileukemic and antitumor agent from *Taxus brevifolia*". *Journal of American Chemical Society*, Vol 93, No. 9, pp 2325–2327
<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja00738a045>

Waterbury, John; Watson, Stanley, Glazer, Alexander y Ong, Linda (1989): Patente No. 4857474 A. Estados Unidos.

Watts, Philip y Frank, Fish (2002): Patente n° 6431498. Estados Unidos

Weber W, Murray M, Howle L y Fish F (2009): "Comparison of real and idealized cetacean flippers". *Bioinspiration & Biomimetics*. Vol. 4, pp. 1-12. <http://darwin.wcupa.edu/~biology/fish/pubs/pdf/2009BBIdealFlipper.pdf>

Wegmann, Jake (2010): "Three Takes on Responding to Crisis as Berkeley's CED Turns 50". *Berkeley Planning Journal*, Vol. 23, No.1, University of California, Berkeley

Weitzman, M (1976), On the Welfare Significance Of National Product In A Dynamic Economy. *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 90, pp. 156–162.

Werth, Alexander (2004): "Models of hydrodynamic flow in the bowhead whale filter feeding apparatus". *The Journal of Experimental Biology*, No. 207, pp.3569-3580.

Wheeler, A; James, G y Evans, C (1981): Control of Calcium Carbonate Nucleation and Crystal Growth by Soluble Matrix of Oyster Shell. *Science*. Vol. 212, No.19, pp. 1397-1398.

World Intellectual Property Organization WIPO (2002): Traditional Knowledge – Operational Terms and Definitions. En Third Session of Intergovernmental Committee on Intellectual Property and Genetic Resources, Traditional Knowledge and Folklore, Geneva.

World Intellectual Property Organization WIPO (2006): Lost in transition? Traditional healers of South East Nigeria and the delegitimization of traditional knowledge and cultural expressions in the age of modernity. En tenth session Wipo panel on indigenous and local communities concerns and experiences in promoting, sustaining and safeguarding their traditional knowledge, traditional cultural expressions and genetic resources". Intergovernmental Committee on Intellectual Property and Genetic Resources, Genova.

Wright, J (2001): Cryptobiosis 300 years on from van Leuwenhoek: what have we learned about tardigrades?. *Zoologischer Anzeiger*, Vol. 240, pp. 563-582.

Yandle, Bruce; Bhattarai, Madhusudan y Vijayaraghavan, Maya (2004): Environmental Kuznets Curves: A Review of Findings, Methods, and Policy Implications. *Perc Research Study 02-1 Update*, pp. 1-38.

Young, Truman y Okello, Bell (1998): "Relaxation of an induced defense after exclusion of herbivores: spine length in *Acacia drepanolobium*". *Oecologia*, No.115, pp. 508-513.

Zárate, Arturo; Basurto, Lourdes y Saucedo, Renata (2009): Endo recibió el premio Lasker por descubrir las estatinas como tratamiento para la enfermedad

cardiovascular. Ensayos y Opiniones. Acta Médica Grupo Ángeles. Vol. 7, No. 3, pp. 172-175.

Zhang, Jidong y Bhatnagar, Neerja (2009): Patente No. 7585855 B2. Estados Unidos.

Zhang, Shuguang (2003): Fabrication of novel biomaterials molecular self-assembly. Nature Biotechnonology. Vol. 21, No. 10, pp. 1117-1178.

Zhang Wei-Bin (1990): Economic Dynamics: Growth and Development. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.

Zhang, Wei y Swinton, Scott (2012): Optimal control of soybean aphid in the presence of natural enemies and the implied value of their ecosystem services. Journal of Environmental Management. No. 96, pp. 7-16.